

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

## **Návrh akustické sondy pro zjišťování netěsností karoserie osobního vozu**

## **Design of an acoustic probe for recognition of untightnesses in car body**

### **Bakalářská práce**

Autor: **Pavel Dušek**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Mareš

Konzultant: Ing Petr Pelant, Akustická zkušebna Škoda Auto

Liberec 19. 5. 2006

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra:

Akademický rok: 2005/2006

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Pavel Dušek**

studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona o vysokých školách č.111/1998 Sb. určuje tuto bakalářskou práci:

Název tématu: **Návrh akustické sondy pro zjišťování netěsností karoserie osobního vozu**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se se základní teorií elektroakustiky a šíření hluku.
2. Navrhněte jednoduchý systém akustického měniče a zesilovače.
3. Proveďte diagnostiku jeho statických a dynamických vlastností a cejchování.
4. Ověřte funkce na modelovém případě nebo v praxi.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran

Seznam odborné literatury:

[1] Škvor, Z.: Akustika a elektroakustika. Academia, Praha 2001

[2] Novotný, V.: Nízkofrekvenční elektronika 3. SNTL, Praha 1986

[3] Dokumentace fy. Brüel & Kjaer

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Mareš

Konzultant: Ing. Petr Pelant, Akustická Zkušebna Škoda Auto, a.s.

Zadání bakalářské práce: **19.10.2005**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19. 5. 2006**

.....  
Vedoucí katedry

.....  
Děkan

V Liberci dne 19.10.2005

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že s o u h l a s í m s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Jiřímu Marešovi za odborné vedení a shovívavou trpělivost při tvorbě této práce a panu Ing. Petrovi Pelantovi za poskytnutou důvěru pro zpracování tématu.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním hluku a návrhem sondy umožňující rozpoznávání zdrojů hluku v těžko přístupných místech v osobním automobilu pro Akustickou zkušebnu Škoda Auto. Shrnuje teoretické znalosti o hluku, jeho šíření a zejména o jeho měření a prostředcích k tomu určených. Na základě výběru součástí elektroakustického přístroje je proveden návrh desky plošného spoje v prostředí EAGLE a zrealizován funkční prototyp. Praktické použití vyžaduje znalost základních charakteristik mikrofónu, pro jejichž měření byl vytvořen projekt pro multianalizátor PULSE firmy Brüel & Kjaer. Funkčnost přístroje byla ověřena na reálném případě a navrženy možnosti jejího zlepšení.

## **Abstract**

The bachelor work describes problems of sound investigation and design of an acoustic probe for Škoda Auto, Department of acoustics, which should enable searching for sound sources in poorly accessible places in car. The work summarizes theoretical knowledge about sound, sound propagation and especially about measuring of sound and devices designed for it. After the printed circuit board in the software tool EAGLE was designed, a workable prototype was created. Because of need to know the basic characteristics of microphone for practical use, a project for Brüel & Kjaer's multi-analyzer PULSE was created for this measuring. The functionality of the instrument was tested in real conditions and suggestions of improvement were made.

# Obsah

Prohlášení.....	- 2 -
Poděkování.....	- 5 -
Abstrakt.....	- 6 -
Seznam použitých zkratk .....	- 10 -
Seznam použitých symbolů .....	- 11 -
Úvod.....	- 13 -
1. Základy akustiky.....	- 14 -
1.1 Veličiny pro popis zvukových vln .....	- 14 -
1.1.1 Decibelové stupnice .....	- 16 -
1.2 Zvukové vlny a jejich šíření.....	- 17 -
1.2.1 Rovinné a kulové volné postupné vlny .....	- 17 -
1.2.2 Ohyb.....	- 19 -
1.2.3 Složené vlny .....	- 20 -
1.2.4 Zvuk v malých uzavřených prostorech, stojaté vlny, rezonance .....	- 20 -
1.2.5 Zvuk se spojitým spektrem - hluk.....	- 22 -
1.3 Pole zvukových vln.....	- 23 -
1.3.1 Volné pole.....	- 23 -
1.3.2 Blízké akustické pole .....	- 23 -
1.3.3 Vzdálené volné pole.....	- 23 -
1.3.4 Dozvukové difúzní pole.....	- 24 -
2. Akustická měření .....	- 24 -
2.1 Elektroakustické řetězy .....	- 24 -
2.1.1 Elektromechanické a elektroakustické měniče – mikrofony .....	- 25 -
2.1.1.1 Elektromechanický měnič elektrodynamický.....	- 27 -
2.1.1.2 Elektromechanický měnič elektrostatický .....	- 28 -

2.1.1.3 Elektromechanický měnič s piezoelektrickými prvky .....	30 -
2.1.1.4 Elektromechanické měniče elektretové .....	30 -
2.1.2 Nízkofrekvenční zesilovače .....	31 -
2.2 Měření akustického tlaku .....	32 -
2.2.1 Měření akustického tlaku v akustických polích.....	32 -
2.3 Zpracování signálů v číslicových analyzátoch .....	33 -
2.3.1 Kmitočtové analyzátory .....	33 -
2.3.1.1 Analyzátory s konstantní poměrnou šířkou pásma (CPB).....	35 -
2.3.1.2 Analyzátory s konstantní absolutní šířkou pásma (FFT) .....	36 -
2.3.2 Průměrování spekter .....	36 -
2.3.3 Akustické vážení.....	37 -
3. Konstrukce mikrofonní sondy .....	38 -
3.1 Elektroakustický měnič – mikrofon.....	38 -
3.1.1 Napájení mikrofonu .....	39 -
3.2 Předzesilovač .....	40 -
3.2.1 Tranzistorový předzesilovač .....	41 -
3.2.2 Korekční předzesilovač.....	41 -
3.3 Výstupní zesilovač.....	43 -
3.4 Napájení obvodu .....	43 -
4. Návrh desky plošných spojů .....	43 -
4.1 Návrhový systém EAGLE .....	43 -
4.1.1 Modul Library .....	44 -
4.1.2 Modul Schematic .....	44 -
4.1.3 Modul Board .....	44 -
5. Měření charakteristik mikrofonu .....	45 -
5.1 Měření kmitočtových charakteristik .....	45 -



5.2 Měření směrových charakteristik.....	47 -
5.3 Multianalyzátor PULSE.....	47 -
5.3.1 PULSE a prostředí LabShop.....	48 -
5.3.2 Vytvoření projektu, nastavení přístrojů a analyzátorů.....	49 -
5.3.2.1 Připojení snímačů .....	50 -
5.3.2.2 Konfigurační organizátor .....	51 -
5.3.2.3 Organizátor měření .....	52 -
5.3.2.4 Funkční organizátor .....	54 -
5.3.3 Cejchování .....	56 -
5.3.4 Frekvenční odezva – kmitočtová charakteristika.....	59 -
5.3.5 Směrová charakteristika.....	61 -
6. Ověření funkce na modelovém případě .....	63 -
Závěr .....	64 -
Literatura.....	65 -
Příloha A .....	67 -
Příloha B .....	68 -

## Seznam použitých zkratek

**D/A** – digitálně-analogový

**A/D** – analogově-digitální

**CPB** – Constant Percentage Bandwidth – procentuálně konstantní šířka pásma

**FFT** –Fast Fourier Transform – rychlá Fourierova transformace

**RT** –Real Time – reálný čas

**FET** – Field Effect Transistor – tranzistor řízený polem

**PSD** – Power Spectral Density – výkonová spektrální hustota

**DFT** –Discrete Fourier Transform – diskrétní Fourierova transformace

**angl.** – anglicky

**LIN** – lineární

**EXP** – exponenciální

**SNR** – signal to noise ratio – odstup signálu od šumu

**SPL** – Sound Pressure Level – hladina akustického tlaku

**PCB** – Printed Circuit Board – deska plošného spoje

**DPS** – deska plošného spoje

**ERC** – Electrical Rule Check – kontrola pravidel elektrického zapojení

**DRC** – Design Rule Check – kontrola návrhových pravidel

**CCLD** –Constant Current Line Drive

**BNC** – bayonet connector

## Seznam použitých symbolů

$v$	.....	rychlost
$\xi$	.....	vektor akustické výchylky
$r$	.....	polohový vektor
$t$	.....	čas
$c$	.....	rychlost zvuku
$f$	.....	frekvence
$\lambda$	.....	vlnová délka
$I$	.....	intenzita zvuku
$p_{ef}$	.....	efektivní hodnota tlaku
$\rho$	.....	hustota
$P_a$	.....	akustický výkon
$\omega$	.....	úhlová frekvence
$p_0$	.....	referenční akustický tlak (20 $\mu$ Pa)
$\Phi_0$	.....	stejnoseměrná složka magnetického toku
$F$	.....	síla
$i$	.....	proud
$e$	.....	elektromotorické napětí
$v$	.....	rychlost,
$B$	.....	magnetická indukce
$l$	.....	délka vodiče
$\eta$	.....	výchylka elektrody
$U_0$	.....	stejnoseměrné napětí
$R_n$	.....	elektrický odpor
$\varepsilon$	.....	permitivita prostředí

$C$  ..... kapacita  
 $Q$  ..... náboj  
 $k_b$  ..... převodní činitel elektrostatického měniče  
 $\delta$  ..... hustota náboje  
 $D$  ..... indukční tok  
 $H_K$  ..... přenosová funkce  
 $L_{dBV}$  ..... hladina napětí  
 $L_p$  ..... hladina akustického tlaku

## Úvod

Již Beranek [1] si před více než čtyřiceti lety dovolil prognózu, že odvětví akustiky, které zaznamená nebývalý rozvoj, bude právě potlačování hluku. Nemýlil se, ale pravděpodobně nedokázal odhadnout možnosti, jaké přinese pro obor akustiky a vibrací rozšíření číslicového zpracování signálů, které otevírá prostor pro další výzkum a vývoj.

Přejeme-li si snižovat množství hluku, je zpravidla nejúčinnějším a v rámci možností nejvyhledávanějším řešením odstranit jeho zdroje nebo je alespoň rozpoznat a omezovat jejich působení. Snažíme se tedy o co nejpřesnější lokalizaci zdrojů hluku, což bývá v tak složitém a komplexním systému jako je automobil často nesnadné. V této práci se budeme zabývat zkoumáním zdrojů způsobujících vnitřní hluk automobilu v důsledku aerodynamických netěsností.

Požadavkem je vytvořit kompaktní přístroj, kterým se bude možné dostat do míst, kam to se zvukoměrem, přesnými měřicími mikrofony nebo jednoduše lidským uchem není možné nebo efektivní.

Praktické požadavky se musejí opírat o mnohdy značně široké interdisciplinární teoretické znalosti. V prvním oddílu teoretické části práce budou uvedeny základní poznatky o vlnění, zvuku a jeho šíření; v dalším pak způsoby měření popisných veličin a charakteristik zvuku, prostředků k tomu určených a možnosti zpracování získaných informací. Experimentální část přiblíží strukturu návrhu vlastního přístroje a měření základních charakteristik mikrofону pomocí multianalyzátoru PULSE firmy Brüel & Kjaer. Funkčnost navrženého přístroje pak bude ověřena na jednoduchém příkladu.

# 1. Základy akustiky

Tato část seznamuje se základní teorií vzniku a šíření zvukových vln a uvádí veličiny sledované v akustických měřeních.

## 1.1 Veličiny pro popis zvukových vln

Vlnění lze popsat jako proces, při kterém se šíří stav fyzikálního objektu prostorem a časem, ale samotný objekt se ve směru šíření nepohybuje. Zdrojem vlnění se může stát jakýkoli objekt, kterému je umožněno, aby se vzruch jím vyvolaný šířil prostředím. Zvukové vlny jsou pak zvláštním případem elastických vln. Tyto vlny se mohou objevit v hmotných a pružných prostředích, protože pružnost prostředí umožňuje, že částice vychýlená ze své klidové polohy je vrácena zpět, podobně jako je tomu u pružin. Protože částice má svou setrvačnou hmotu, může přenášet hybnost na sousední částice. [1]

Nejběžnějším prostředím pro šíření zvuku je vzduch, kde dochází ke kmitání částic ve směru šíření zvukových vln a mluvíme tedy o podélném vlnění. Mohutnost zvukové vlny neboli její amplituda je určena výchylkou molekul v nějakém směru a zpět. Další parametry kterými lze popsat zvukovou vlnu, jsou *rychlost částic* a *akustický tlak*. Rychlost částic nazývaná *akustická rychlost* je rychlost, s níž probíhá výchylka. Podle [3] je vektor akustické rychlosti

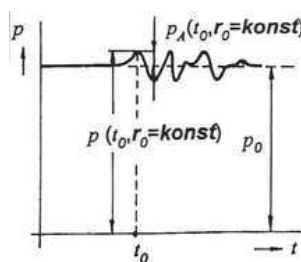
$$\mathbf{v}(t, \mathbf{r}_0) = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}],$$

kde  $\xi(t, \mathbf{r}_0) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_0$  [m], tedy vektor akustické výchylky daný jako rozdíl polohového vektoru částice v čase  $t$  a polohového vektoru částice v klidu.

Při pohybu molekul dochází ke změně jeho směru a lze též uplatnit změnu zrychlení nebo hybnosti. Protože síla je definována jako míra změny hybnosti, lze měřením sil způsobujících pohyb molekul vzduchu z jejich rovnovážných poloh přímo určovat amplitudu zvukové vlny. Měřit sílu působící na několik molekul je však obtížné, proto měříme sílu působící na jednotkovou plochu neboli tlak. [1] Postupuje-li zvuková vlna vzduchem, dochází periodicky i neperiodicky k malým odchylkám od normálního atmosférického tlaku. Tato časově proměnná složka celkového tlaku v daném místě (viz Obr. 1. podle [3]) je nazývána *akustický tlak*, pro který [3] platí

$$p_A(t, \mathbf{r}_0) = p(t, \mathbf{r}_0) - p_0(\mathbf{r}_0) \quad [\text{Pa}],$$

kde  $p_A$  je akustický tlak,  $p(t, \mathbf{r}_0)$  celkový tlak a  $p_0$  je statický (barometrický) tlak.



**Obr. 1: Fluktuace tlaku - akustický tlak**

V lineární akustice, tedy v případech v běžném životě, kdy akustický tlak nenabývá velkých hodnot, tvoří akustický tlak ve vzduchu co do velikosti jen nepatrnou část atmosférického tlaku. Lze odvodit [2] vlnovou rovnici pro akustický tlak:

$$\text{div grad } p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}.$$

Kmitočet souvisí s rychlostí zvuku vztahem, v němž vystupuje důležitá veličina – vlnová délka. Vlnová délka zvukové vlny je vzdálenost, kterou vlna urazí v jedné periodě. Platí vztah

$$c = f \cdot \lambda, \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost zvuku [m/s],  $f$  je kmitočet [Hz] a  $\lambda$  vlnová délka [m].

Pro člověka je slyšitelným zvuk ležící v určitém rozsahu kmitočtů a amplitud akustického tlaku. Prahová hodnota akustického tlaku se u kmitočtu 1 kHz uvádí 20  $\mu\text{Pa}$  a na straně velkých tlaků je vnímání omezeno nejvyššími fyziologicky snesitelnými tlaky při hmatovém prahu, které jsou v okolí kmitočtu 1 kHz zhruba 60 Pa [3]. Zvyšováním tlaku nad hodnoty hmatového prahu se blížíme prahu bolesti, kdy je zvuk vnímán bolestivě a kdy dochází k porušení sluchového orgánu.

Vedle akustického tlaku, akustické rychlosti a rychlostního potenciálu je dalším důležitým pojmem *intenzita zvuku*. Je definována jako energie procházející jednotkou plochy kolmé ve směru šíření zvukových vln, za jednotku času, neboli jde o tok výkonu.

Pro intenzitu zvuku platí vztah

$$I = p \cdot v.$$

Pro rovinné vlny lze [2] použitím poměru  $p/v$  označovaného jako akustický vlnový odpor prostředí upravit vzorec pro intenzitu zvuku na

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho c} = \rho c v_{ef}^2, \quad (2)$$

kde  $p_{ef}$  a  $v_{ef}$  jsou efektivní hodnoty akustického tlaku, resp. rychlosti. Stanovení akustického výkonu přenášeného rovinnou vlnou je možné na základě měření akustického tlaku, nebo akustické rychlosti. Pro jiné než rovinné vlny je třeba stanovit intenzitu zvuku podle vztahu

$$I = p_{ef} v_{ef} \cos \varphi,$$

kde  $\varphi$  je fázový úhel mezi tlakem a rychlostí. Výraz  $\frac{p^2}{\rho c}$  v (2) vyjadřuje střední hustotu akustické energie, neboli energii akumulovanou v malém objemu plynu působením akustického pole.

Výše uvedené veličiny popisující zvukové vlny ještě doplníme o základní veličinu kvantizující zdroje zvuku, *akustický výkon*. Všechn výkon vyzařovaný zdrojem značený  $P_a$  musí procházet nějakou uzavřenou plochou, která plně obklopuje zdroj. Se vzdalováním se od zdroje lze pozorovat, že výkon připadající na jednotkovou plochu v okamžité poloze klesá, protože celkový výkon se rozkládá na větší plochu. Akustický výkon procházející plochou je roven intenzitě. Platí tedy

$$P_a = I \cdot S \quad [\text{W}]$$

### 1.1.1 Decibelové stupnice

Pro vyjadřování a lepší srozumitelnost se v akustice používají decibelová vyjádření charakteristických veličin. Jedním z důvodů je například obrovský rozsah akustických výkonů běžných zdrojů zvuku, od  $1 \cdot 10^{-9} \text{ W}$  představovaný šepem až po  $0,1 \text{ MW}$  při startu proudového letadla. Zavádíme tedy logaritmické stupnice vyjadřující akustický výkon pomocí „exponentů“. Vzhledem k vlastnostem operací s logaritmy je požadováno logaritmovat pouze bezrozměrné číslo, musíme tedy zavést poměrnou veličinu skutečného výkonu k referenčnímu.

Velichinu akustického výkonu v logaritmické nelineární stupnici nazveme *hladinou akustického výkonu*, platí [1]



$$L_p = 10 \log \frac{P_a}{P_{a0}} \quad [\text{dB vzhledem k } P_{a0}].$$

Uvědomíme si nutnost volby referenční hodnoty pro vyjádření poměru výkonů. Volí se obvykle tak, aby výpočet byl pohodlný.

Obdobně jako pro akustický výkon je definována i *hladina intenzity zvuku*:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB vzhledem k } I_0],$$

kde  $I$  je zvuková intenzita ve  $\text{W/m}^2$ , jejíž hladinu vyjadřujeme a  $I_0$  referenční intenzita, za níž se obvykle volí hodnota  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . A dále také [1] definujeme *hladinu akustického tlaku* vycházející z poměru středních kvadratických hodnot akustického tlaku. Platí

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB vzhledem k } p_0],$$

kde  $p_0$  je referenční akustický tlak.

Volba referenčních hodnot pro akustický výkon, intenzitu a tlak byla provedena tak, aby mezi decibelovými stupnicemi pro hladinu akustického výkonu, hladinu intenzity a hladinu akustického tlaku byly za určitých okolností vhodné vzájemné vztahy [1]. Práh slyšení při kmitočtu 1 kHz u mladého člověka s dobrým sluchem odpovídá akustickému tlaku 0,0002  $\mu\text{bar}$  a tento byl zvolen za referenční. Referenční akustická intenzita byla zvolena tak, aby hladina intenzity a hladina akustického tlaku byly přibližně stejné jak pro rovinné, tak pro kulové vlny ve vzduchu při teplotě místnosti a při hladině moře.

## 1.2 Zvukové vlny a jejich šíření

Zvukové vlny dělíme podle způsobu, jakým vznikají a dále charakterizujeme, jak se šíří prostředím.

### 1.2.1 Rovinné a kulové volné postupné vlny

V dosavadním textu byl pro jednoduchost ukázán význam akustických veličin na příkladu jedné oddělené zvukové vlny. Ta mohla vzniknout pohybem pístu kmitajícího na konci nekonečně dlouhé trubky s bezodrazovým zakončením. Takovouto vlnu označujeme jako jednorozměrnou rovinnou volnou postupnou vlnu.

Jednorozměrná proto, že charakteristické veličiny závisí pouze na jedné souřadnici polohy; rovinná proto, že čela vln jsou navzájem rovnoběžná, a volná postupná proto, že se vlna šíří, aniž je rušena překážkou nebo se nějak mění v prostředí.

Matematický popis přímé postupné vlny je

$$p(x, t) = p_m \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \right], T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (3)$$

kde  $p_m$  je maximální hladina akustického tlaku [ $\text{N/m}^2$ ],  $x$  je vzdálenost, o kterou vlna postoupila [m],  $t$  doba [s],  $c$  rychlost zvuku,  $\omega$  kruhový kmitočet. Z rozboru významu rovnice (3) a (1) vyplývají důležité poznatky. Rovinná postupná přímá zvuková vlna se pohybuje zleva doprava, aniž se přitom mění maximální hodnota tlaku, tedy  $p_m$  není funkcí  $x$ ; akustický tlak se v každé poloze  $x$  mění se stejným kruhovým kmitočtem  $\omega$  jako v jakékoli jiné poloze a vzdálenost má pouze ten vliv, že způsobuje časové zpoždění, v němž tlak v nějakém bodě nabývá hodnoty stejné jako v bodě  $x = 0$ .

Šíří-li se vlna v záporném směru vzhledem k  $x$ , nazýváme ji zpětnou postupnou vlnou. Může k tomu dojít tak, že na pravý konec trubky se vloží též akustický zdroj nebo se trubka v místě bezodrazového zakončení přepaží odražející stěnou. To způsobí, že se přímá postupná vlna vrátí zpět a v rovnici (3) dojde ke změně znaménka v kulaté závorce.

Dochází-li v trubici ke skládání přímé a zpětné postupné vlny, zjistíme, že již akustický tlak nepostupuje vlevo nebo vpravo a vlna přestává být postupnou. Akustický tlak v každém bodě sinusově vzrůstá a klesá v závislosti na čase, v bodech  $x = \lambda/4$  a  $x = 3\lambda/4$  je nulový.

Pulsuje-li kolem svého rovnovážného stavu koule, kdy se její povrch pravidelně stahuje a rozpíná, dochází ke stlačování a vzdalování molekul v blízkosti koule a vzniká kulová vlna. Taková vlna se šíří všemi směry. Přestože se vlna již šíří s kulovým čelem, stále jsou všechny veličiny pro její popis závislé pouze na jednom parametru, na vzdálenosti čela vlny od středu koule. Takovýto kulový zdroj je možné obecně převést na bodový zdroj vyzařující stejný akustický výkon.

Pro kulovou vlnu platí

$$p(r, t) = \frac{p_0}{r} \cos \omega \left( t - \frac{r}{c} \right).$$

Porovnáme-li tuto rovnici se vztahem (3), vidíme zajímavé rozdíly. Když se kulová vlna šíří od zdroje, její tlaková amplituda klesá nepřímo úměrně s  $r$ ; akustická vlna má v každém bodě  $r$  stejný kmitočet jako kulový zdroj, který ji vybuzuje a vzdálenost  $r$  má kromě vlivu na amplitudu také vliv na časové zpoždění, fázový posuv ve vlně.

Další rozdíl mezi rovinnými a kulovými vlnami zjistíme, uvažujeme-li intenzitu dané zvukové vlny v daném bodě. U rovinné vlny zůstává intenzita konstantní bez ohledu na to, jak daleko je vlna od zdroje, protože plocha čela vlny je konstantní. Ovšem u kulové vlny se čelo plochy zvětšuje úměrně se čtvercem vzdálenosti, jak vlna postupuje od zdroje. Intenzita se tedy zmenšuje podle čtverce vzdálenosti od zdroje s konstantním výkonem. V [1] je tento vztah popsán jako „zákon převrácených čtverců“ s matematickým vyjádřením

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{p_{ef}^2 \text{ (ve vzdálenosti } r \text{)}}{\rho_0 c}, \text{ kde } P \text{ je celkový akustický výkon vyjádřený}$$

zdrojem zvuku.

Důležitou vlastností akustických vln je schopnost odrazu. Při dopadu rovinné akustické vlny na ideální stěnu je úhel odrazu roven úhlu dopadu, intenzita v dopadající a odražené vlně a fáze obou vln jsou shodné. Pro skutečné stěny toto plně neplatí vzhledem k částečné absorpci a prostupu zvuku, avšak geometrické a fázové vztahy odpovídají přibližně uvedenému [4].

### 1.2.2 Ohyb

Volné postupné vlny byly definovány jako vlny v prostoru bez překážek a beze změn v prostředí, ve kterém se šíří. Častěji však je volný prostor omezen překážkami, které způsobí změny tvaru vlny. Matematický popis vzájemného působení vlny a překážky je obecně velmi složitý, uvedeme tedy pouze zjednodušený případ, kdy rovinná vlna dopadá na rozlehlou rovinnou stěnu, v níž je malý otvor. Jakmile vlna dorazí na tuto stěnu, část se jí odrazí, takže vznikne vlna rovinná postupující ve směru opačném než dopadající vlna. Zvuk, který projde malým otvorem, postupuje dále v kulové vlně. [1]

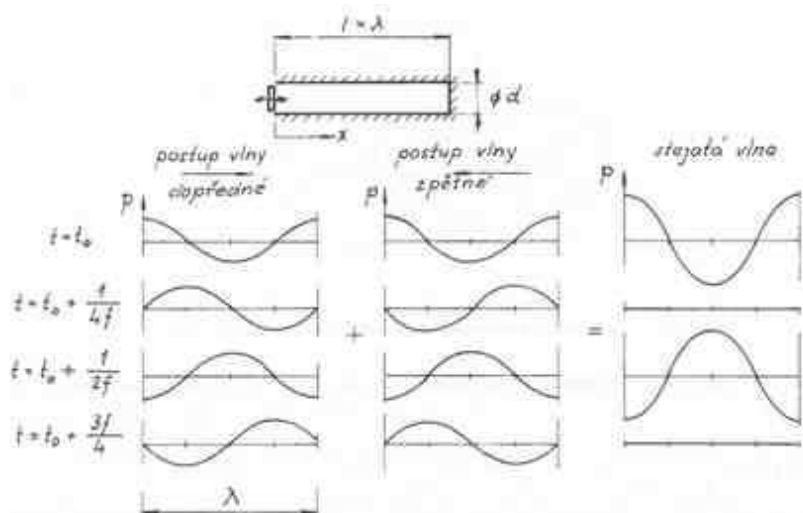
### 1.2.3 Složené vlny

Dosud jsme uvažovali vlny pouze o jediném kmitočtu, tzv. „čisté tóny“. Takové ovšem samy od sebe v přírodě neexistují, zvuková vlna bývá složena z mnoha dílčích, složkových vln, které se skládají ve výslednou složenou vlnu. Postup skládání záleží v tom, že se v určitém časovém okamžiku amplitudy jednotlivých složek lineárně sečtou v amplitudu periodické složené vlny. Podle metody Fourierovy analýzy lze na jakoukoli vlnu periodického průběhu nahlížet jako na kombinaci sinových vln, jejichž kmitočty jsou celistvými násobky základního kmitočtu. Vlnové složky násobných kmitočtů se pak nazývají vyšší harmonické. Lze předpokládat, že vliv na skládání vln bude mít i jejich fázový posun. V [1] je však podrobně vysvětleno, proč není fáze důležitá k určení efektivní hodnoty vlny složené ze sinových vln o různých kmitočtech a veškeré potřebné informace o amplitudách potom získáváme ze spekter.

### 1.2.4 Zvuk v malých uzavřených prostorech, stojaté vlny, rezonance

Odrazem povrchových vln od stěn uzavřeného prostoru může uvnitř tohoto prostoru vznikat stojaté vlnění, vyznačující se tím, že akustický tlak je obecně ve všech bodech tohoto prostoru při dané frekvenci čistého tónu ve fázi nebo protifázi, jeho amplituda je v každém bodě jiná a v čase konstantní. Nejjednodušší případy stojatého vlnění nastávají za předpokladu vzniku rovinných vln v prostoru.

Na Obr. 2 podle [4] jsou zakresleny odpovídající časové průběhy tlaků po čtvrtperiodách v trubici přibližně velikosti vlnové délky ( $l = \lambda$ ) a o průměru řádově menším než vlnová délka ( $d \ll \lambda$ ), ve které je buzena tlaková vlna o délce  $\lambda$  postupující zleva doprava. Tato vlna se (ideálně) odráží od pravého čela trubice a postupuje zpět zprava doleva. V čase  $t_0$  je průběh tlaků po délce trubice od této vlny stejný jako u vlny levo-pravé. Časový průběh této pravo-levé vlny v následujících čtvrtperiodách je však antisymetrický. Součtem akustických tlaků v jednotlivých průřezech trubice vzniká průběh tlaků naznačený v pravé části obrázku, tedy vlna stojatá [4].



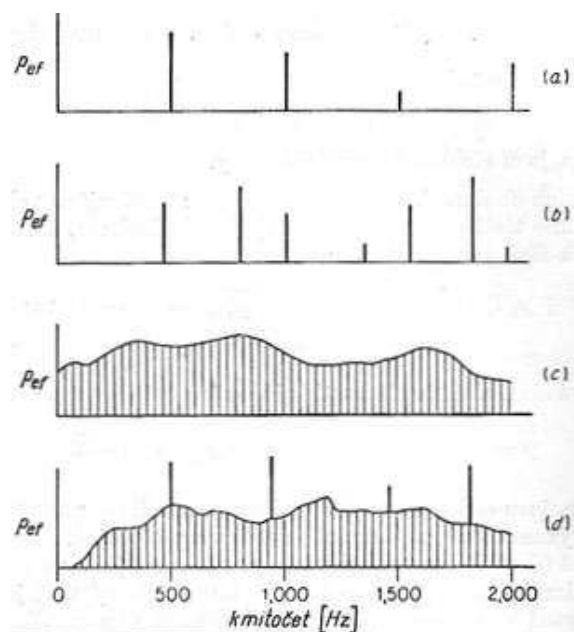
**Obr. 2: Vznik rovinného stojatého vlnění v trubici**

Ve vzdálenostech  $l/4$  a  $3l/4$  jsou místa s nulovou amplitudou akustického tlaku – uzly stojatého vlnění. V ideálních podmínkách (bez ztrát) by takovéto vlnění vznikalo při buzení trvajícím alespoň po dobu, kterou čelo budící vlny potřebuje na proběhnutí dráhy od místa buzení k místu odrazu a zpět. Stojatá vlna by se udržovala odrazem na obou čelech trubice. Pokud by buzení danou frekvencí pokračovalo, amplituda akustického tlaku stojaté vlny by neustále narůstala přívodem vnější energie a došlo by k akustické rezonanci. Ke vzniku stojatého vlnění, resp. rezonance může dojít vždy, je-li délka trubice  $l = n\lambda/2$  ( $n=1,2,\dots,n$ ) neboli pro vlastní akustické frekvence  $f_{vn} = nc/2l$ . Počet uzlů je pak obecně roven  $n$ . Pokud  $l \neq n\lambda/2$  ( $n$  celé číslo), je průběh amplitud tlaků uvnitř trubice obecně proměnný v čase i délce. Působí-li na konci trubice trvalé harmonické buzení s frekvencí  $f \neq nc/2l$ , ustalují se po čase v trubici tlakové podmínky tak, že amplitudy akustického tlaku v každém místě mají určitou konstantní hodnotu, avšak jejich velikost v těchto nerezonančních oblastech je malá.

Tyto výsledky je možno snadno extrapolovat pro třidimenzionální případ pravoúhlých prostorů tvaru kvádru, kde může vzniknout vlnění jakéhokoliv směru, nicméně stojaté vlnění může vzniknout pouze v přesně vymezených frekvencích a jim příslušných modech (tvarech kmitu, kdy každému místu prostoru přísluší určitá amplituda akustického tlaku v dané rezonanční frekvenci). V praxi se však setkáváme s kvádrovými prostory pouze výjimečně. Vlastní frekvence a jim příslušné tvary kmitu musí být řešeny pomocí přibližných výpočtových postupů.

### 1.2.5 Zvuk se spojitým spektrem - hluk

Na Obr. 3 podle [1] jsou znázorněny čtyři kategorie spekter. Čárové spektrum obsahující jako složky pouze amplitudy harmonických (a), čárové spektrum obsahující neharmonické složky (b), spojitě spektrum (c) a kombinované, složené z čárového a spojitěho spektra (d).

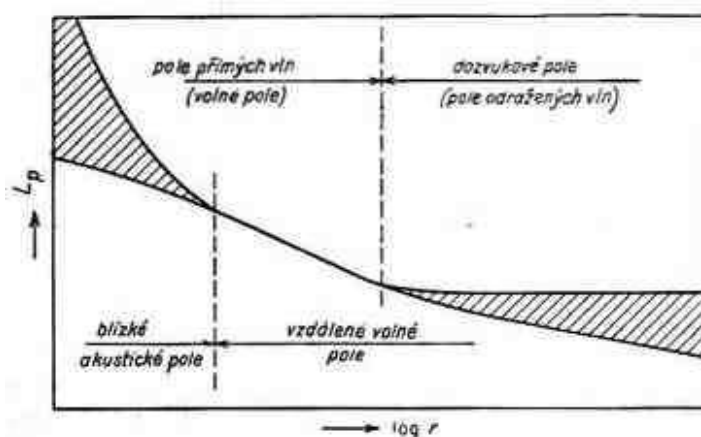


Obr. 3: Kategorie spekter

Zvuk složený z celého kontinua složek je nazýván hlučím. Aby takový hluk vznikl z čistých tónů, bylo by k tomu nekonečně mnoha vln s velmi malými amplitudami. Specifické je i měření hluku. Nejjednodušší je měřit celkovou hladinu akustického tlaku. Hodnota, kterou bychom v takovém případě dostali je závislá na kmitočtovém rozsahu měřiče a žádné dva měřiče různých typů nedají stejný výsledek. Taková metoda tedy není vhodná a bylo dohodnuto, že by se hluk se spojitým spektrem měl specifikovat znázorněním efektivního akustického tlaku nebo intenzity jako funkce kmitočtu v celém kmitočtovém rozsahu, a to v intervalech po 1 Hz a při šířce pásma 1 Hz. Tato jinak přijatelná metoda popisu hluku se spojitým spektrem je však znesnadněna tím, že nejsou k dispozici přístroje pro měření efektivního akustického tlaku v tak úzkých pásmech. Proto musíme měřit v širších kmitočtových pásmech [1].

### 1.3 Pole zvukových vln

Jako zvukové pole označujeme oblast pružného prostředí obsahujícího zvukové vlny. Charakter akustického pole se může měnit podle vzdálenosti od zdroje, viz Obr. 4 podle [1].



Obr. 4: Pole zvukových vln

#### 1.3.1 Volné pole

Volným polem rozumíme prostor, ve kterém se zvuk šíří bez odrazů. Toto je splněno ve venkovním prostoru v dostatečné vzdálenosti od zemského povrchu nebo v bezodrazové komoře, kde jsou veškeré vlny dopadající na stěny pohlceny.

#### 1.3.2 Blízké akustické pole

V blízkosti zdroje nemusí být směr akustické rychlosti shodný se směrem šíření vln a v některých bodech může existovat značná tečná složka rychlosti. Jako blízké pole označujeme oblast, ve které se vyskytují podobné poměry. Je často charakterizováno značnými změnami akustického tlaku v závislosti na poloze, i když je zdroj zvuku ve volném prostoru. Mezi intenzitou a čtvercem akustického tlaku zde neplatí jednoduchý vztah. Velikost blízkého pole zdroje hluku závisí na kmitočtu, na charakteristickém rozměru zdroje a fázích.

#### 1.3.3 Vzdálené volné pole

Vzdálené pole je prostor vzdálený od zdroje zvuku, kde okamžitý akustický tlak a okamžitá akustická rychlost jsou v podstatě ve fázi. Je-li zdroj zvuku ve volném prostoru nebo je-li absorpce zvuku v uzavřeném prostoru tak velká, že ještě nepřevažuje

dozvukové pole, klesá hladina akustického tlaku na každé zdvojnásobení vzdálenosti o 6 dB.

### **1.3.4 Dozvukové difúzní pole**

Oblast, kde se vlny odražené od stěn a omezujících ploch skládají s vlnami vycházejícími přímo od zdroje nazýváme dozvukové pole. Prostor je vyplněn mnoha odraženými vlnami a akustický tlak dosahuje hladiny, která v podstatě nezávisí na vzdálenosti od zdroje. Dozvukové pole můžeme označit jako difúzní pole, přichází-li velmi mnoho odražených vln v nejrůznějších možných směrech a je-li hustota akustické energie téměř zcela rovnoměrně rozložena v akustickém poli. [1]

## **2. Akustická měření**

Měřením akustických veličin rozumíme zejména měření akustického tlaku, akustické rychlosti, akustického výkonu, impedance a měření hlasitosti. Většina měření mechanických a akustických veličin se provádějí pomocí elektromechanických elektroakustických měničů spojených s vhodnými elektrickými měřicími přístroji nebo soupravami. Pod pojmem elektromechanický měnič se rozumí zařízení převádějící veličiny mechanické na vhodné veličiny elektrické nebo naopak. Obdobně pod pojmem elektroakustický měnič se rozumí zařízení převádějící veličiny elektrické na veličiny akustické.

### **2.1 Elektroakustické řetězy**

Primární signál z elektroakustického měniče je třeba zesílit a jinak upravovat. Soubor elektronických obvodů, který toto zajišťuje nazýváme elektroakustický řetěz. Tento řetěz má nejčastěji výstup elektrický – linkový nebo elektroakustický – reproduktorová kombinace.

Každý elektroakustický řetěz v širším slova smyslu se tedy skládá ze tří základních článků:

- zdroj signálu
- elektronických zesilovacích a korekčních obvodů
- spotřebiče elektrického signálu nebo elektroakustického měniče.



### 2.1.1 Elektromechanické a elektroakustické měniče – mikrofony

Elektroakustické měniče v elektroakustickém řetězu mohou být rozmanité, zabývat se budeme však pouze elektromechanickými a elektroakustickými měniči jako zdroji signálu, tedy mikrofony.

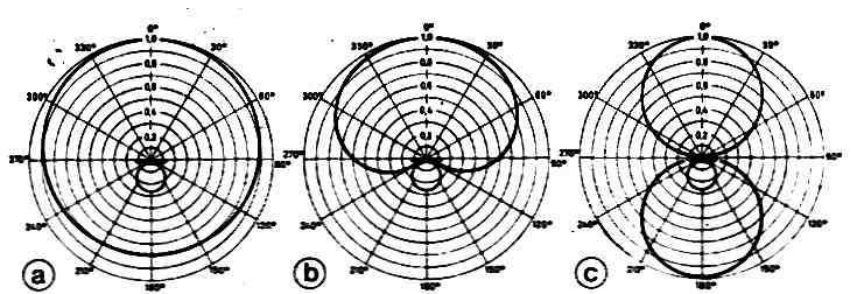
Parametry mikrofونů jsou kmitočtová charakteristika, směrová charakteristika, činitel směrovosti, činitel vzdálenosti, citlivost mikrofону, výstupní impedance, nelineární zkreslení a mezní akustický tlak.

*Kmitočtová charakteristika* udává rozsah přenášeného pásma akustických signálů. Nerovnoměrnost kmitočtové charakteristiky – její zvlnění – by neměla být v požadovaném pásmu větší než  $\pm 5$  dB, vztažená k rovnému průběhu.

*Směrová charakteristika* udává závislost citlivosti mikrofону na úhlu, který svírá jeho osa se směrem akustických vln dopadajících na mikrofон; udává se zpravidla ve vodorovné rovině. Může mít tvar:

- a) **kulový**. Mikrofон je při nízkých a středních kmitočtech všesměrový, tzn. jeho citlivost je v uvedeném pásmu pro všechny směry stejná. Pro vyšší kmitočty se stává mikrofоnem jednostranně směrovaným, což je způsobeno deformací akustického pole rozměry mikrofону. Kulová charakteristika může být vytvořena jedině tlakovým mikrofоnem (tzv. gradientním mikrofоnem nultého řádu).
- b) **osmičkový**. Tato charakteristika může být vytvořena rychlostním mikrofоnem (gradientním mikrofоnem prvního řádu). Citlivost je stejná ze dvou protilehlých stran ( $0^\circ$  a  $180^\circ$ ). Směrová charakteristika zachovává svůj tvar, tj. osmičku téměř pro všechny kmitočty.
- c) **kardioidní**. Kombinací předešlých dvou typů (tlakového a rychlostního) lze dosáhnout směrové charakteristiky kardioidní. Tento typ mikrofону je citlivý převážně na akustické vlny přicházející zepředu, pro vlny přicházející z protisměru je citlivost vždy menší.
- d) **hyperkardioidní**. Vzniká při přechodu charakteristiky kardioidní na osmičkovou

- e) **směrový**. Směrová charakteristika tohoto typu mikrofonu je velmi úzká. Tyto mikrofony dosahují, zvláště v oblasti vysokých kmitočtů, velkého činitele směrovosti.



Obr. 5: Příklad směrových charakteristik a) všesměrová, b) kardioidní, c) osmičková

*Činitel směrovosti* v podstatě udává poměr druhé mocniny výstupního napětí mikrofonu ke druhé mocnině výstupního napětí stejného mikrofonu, umístěného v dokonale difúzním akustickém poli, za předpokladu stejného akustického tlaku a akustické vlny dopadající ve směru osy mikrofonu. Jako základ byl zvolen mikrofon s kulovou směrovou charakteristikou a jeho činitel směrovosti byl určen činitelem 1.

*Činitel vzdálenosti* představuje odmocnina z činitele směrovosti. Udává, kolikrát lze vzdálit směrový mikrofon od akustického zdroje proti mikrofonu všesměrovému kulovému při zachování stejného poměru přímého a rušivého signálu.

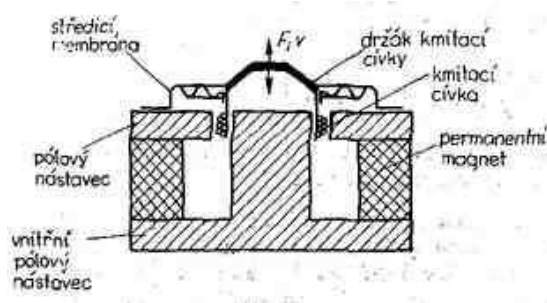
*Citlivost mikrofonu* není rozhodujícím činitelem u mikrofonu, pokud se nezmenší (a to připadá v úvahu pouze u elektrodynamického mikrofonu) pod 0,8 mV/Pa při vnitřním odporu mikrofonu 200  $\Omega$ . Při zachování uvedeného údaje je stále ještě zachován odstup signálu od šumu 45 dB, což je na hranici poznatelnosti. Citlivost se udává v mV/Pa pro určitý kmitočet.

*Výstupní impedance* je podle druhu mikrofonu více či méně závislá na kmitočtu, což není na závadu. Velikost výstupní impedance je důležitá pro připojení mikrofonu k zesilovači.

*Nelineární zkreslení* v používaném kmitočtovém pásmu rozsahu akustických tlaků nemá překročit 0,8 % pro hudbu a 1 % pro řeč. [6]

### 2.1.1.1 Elektromechanický měnič elektrodynamický

Dynamické mikrofony lze rozdělit dále na páskové a cívkové. Nejčastější je konstrukce elektrodynamického měniče s válcovou cívkou v radiálním magnetickém poli magnetického obvodu s permanentním magnetem. Příklad konstrukčního řešení takového měniče je na Obr. 6 podle [5]. Na membránu působí akustický tlak, který ji vychyluje, cívka s vodičem se pohybuje v magnetickém poli. V závitech cívky se indukuje napětí, úměrné rychlosti membrány. Další částí dynamického mikrofону jsou akustické obvody, tvořené především dutinou za magnetickou soustavou, dále dutinami pod membránou a nad membránou. Podstatný vliv na kmitočtovou charakteristiku má i dutina, do které vyústí trubice z vnějšího prostoru s funkcí „bassreflexu“. Dutiny ovlivňují kmitočtový průběh mikrofónu u nižších kmitočtů [6].



Obr. 6: Elektrodynamický mikrofón

Mikrofón má jeden otvor, na který působí akustický tlak v ploše, je proto přijímač nultého řádu. Citlivost mikrofónu nezávisí na vzdálenosti od zdroje a má pro nízké a střední frekvence kulovou směrovou charakteristiku. [7]

Základní vztahy pro ideální elektrodynamický cívkový měnič jsou

$$F = Bli$$

$$v = \frac{1}{Bl} e ,$$

kde  $F$  je síla,  $i$  proud,  $e$  elektromotorické napětí,  $v$  rychlost,  $Bl$  převodní činitel měniče (součin magnetické indukce a délky vodiče, je-li magnetická indukce po celé délce vodiče konstantní a jsou-li zároveň siločáry magnetického pole kolmé na vodič),

$$u = j\omega L_0 i + \frac{n\Phi_0}{d} v ,$$

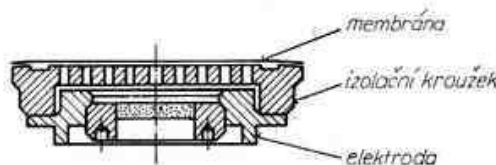
kde  $\Phi_0$  je stejnosměrná složka magnetického toku,  $n$  počet závitů cívky,  $d$  je klidová vzdálenost vzduchové mezery. [8]

Aby bylo možné použít tento měnič k měřicím účelům, musí být zaručena především stálost převodního činitele, tj. součinu  $Bl$ . Proto musí být magnetický obvod a kmitací cívka konstruovány tak, aby se součin  $Bl$  neměnil v dostatečném rozmezí s polohou nebo rozkmitem kmitací cívky. Kromě toho musí být použit magnetický obvod s minimální teplotní závislostí a s co největší dlouhodobou stálostí. Tyto požadavky lze dobře splnit použije-li se kovový permanentní magnet z vhodné slitiny, nejsou vhodné feritové permanentní magnety.

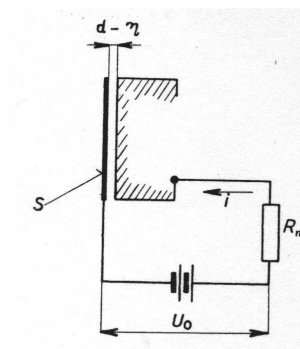
Uvedený popis se týkal dynamického mikrofonu tlakového, tj. s kulovou směrovou charakteristikou. Lze však vytvořit i dynamický mikrofon s kardioidní charakteristikou, podrobnější popis je uveden v [6].

#### 2.1.1.2 Elektromechanický měnič elektrostatický

Elektrostatický neboli kondenzátorový mikrofon je nejkvalitnějším druhem mikrofonu. Skládá se z elektrody, membrány, izolátoru a pouzdra měniče (Obr. 7 podle [6]) Membrána je zhotovena z kovové fólie nebo pokovené plastické hmoty, napnutá na kroužek, který se našroubuje na pouzdro měniče. Ve vzdálenosti 20 až 30  $\mu\text{m}$  od membrány je umístěna elektroda, odizolována od pouzdra a opatřena určitým počtem otvorů. Vzduchová mezera mezi membránou a elektrodou musí být po celé ploše stejnoměrná. Vývod elektrody prochází izolátorem. Do provozního stavu se uvádí vložka stejnosměrným polarizačním napětím (80 až 200 V) z předzesilovače. Velikost polarizačního napětí ovlivňuje citlivost vložky.



Obr. 7: Řez vložkou elektrostatického mikrofonu



**Obr. 8: Principiální schéma elektrostatického měniče**

Principiálně je tento měnič znázorněn na Obr. 8 podle [8]. Membrána má plochu  $S$  a je v blízkosti pevné elektrody. Jejich vzájemná vzdálenost v klidu je  $d$ , při výchylce elektrody o  $\eta$  je  $d - \eta$ . Soustava je napájena stejnosměrným polarizačním napětím  $U_0$ , které se přivádí přes velmi velký odpor  $R_n$ . (V praxi bývá 100 i více  $M\Omega$ . Budeme předpokládat pro teoretické úvahy, že  $R_n = \infty$ . Vliv konečného  $R_n$  se dá později snadno respektovat tak, že si představíme, že měnič je na elektrické straně zatížen přídatným odporem velikosti skutečného  $R_n$ .) [8]. Na dvě vodivé rovinné desky o ploše  $S$ , mezi nimiž je elektrické napětí  $U$  působí síla

$$F = \frac{1}{2} \epsilon S \left( \frac{U}{d} \right)^2,$$

kde  $\epsilon$  je permitivita prostředí mezi deskami,  $d$  vzdálenost desek.

Pro kapacitu mezi oběma deskami platí vztah

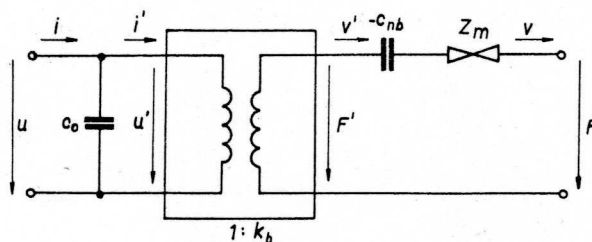
$$C = \epsilon \frac{S}{d}.$$

Jsou-li desky nabitý nábojem  $Q$ , je napětí mezi deskami dáno vztahem

$$U = \frac{Q}{C} = Q \frac{d}{\epsilon S}.$$

Při konstantním náboji je napětí  $U$  úměrné vzdálenosti desek  $d$ . Zavedeme převodní činitel měniče

$$k_b = \epsilon \frac{S}{d^2} U_0 = \frac{C_0 U_0}{d}.$$



**Obr. 9: Náhradní schéma elektrostatického měniče**

Náhradní schéma elektromechanického elektrostatického měniče je na Obr. 9 [8]. Je naznačen jako transformátor, na jehož svorkách jsou na elektrické straně napětí  $u'$  a proud  $i'$  a na mechanické straně síla  $F'$  a rychlost  $v'$ . Mezi nimi platí vztahy

$$\begin{aligned} F' &= k_b u' \\ i' &= k_b v' \end{aligned}$$

Ideální elektrostatický měnič je ve smyslu elektromechanických analogií stejný jako ideální transformátor s převodem  $1: k_b$ .

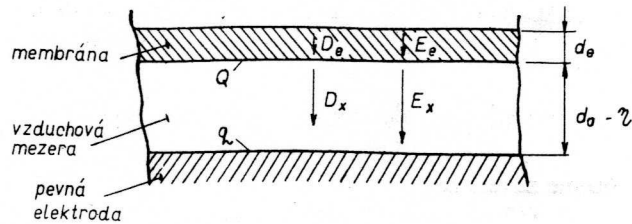
Vytvoření směrových charakteristik je u kondenzátorového mikrofону jednoduché. Elektroda má průchozí otvory, které za součinnosti polarizačního napětí vytvářejí změnu směrové charakteristiky. [6]

### 2.1.1.3 Elektromechanický měnič s piezoelektrickými prvky

Pro svou značnou jednoduchost (jak funkční, tak i výrobní) býval krystalový mikrofón nejrozšířenějším typem. Princip tohoto mikrofónu je založen na piezoelektrickém jevu, tedy vlastností piezoelektrických materiálů, kdy při deformaci krystalu vzniká na plochách náboj úměrný velikosti deformace. Pro zvýšení citlivosti se používají měniče s dvojčaty složenými ze dvou výbrusů, které jsou opatřeny polepy.

### 2.1.1.4 Elektromechanické měniče elektretové

Elektromechanické měniče na bázi elektretů pracují obdobně jako měniče elektrostatické, pouze s tím rozdílem, že nepotřebují vnější polarizační napětí, užívají trvale polarizované elektretové materiály [13]. Časově dostatečně stálé elektrety lze získat buď na bázi některých keramických polykrystalických materiálů, nebo některých polymerů. Dobré vlastnosti vykazuje zvláště teflon polarizovaný buď elektronově nebo jednodušeji elektrickým polem za zvýšené teploty [5].



**Obr. 10: Schéma elektretového měniče**

Vlastnosti jsou ukázány na příkladu jednočinného měniče. Na Obr. 10 [8] je naznačen malý úsek membrány a pevné elektrody. Membrána má tloušťku  $d_e$  a na aktivní ploše (přivracené k pevné elektrodě) vykazuje hustotu náboje  $\delta$ . (Tato veličina závisí na použitém materiálu a způsobu ze elektretování). Z aktivní plochy vytéká z náboje  $Q$  na obě strany v kolmém směru indukční tok, s hodnotami  $-D_e$  a  $D_x$ . Materiál membrány má relativní permitivitu  $\epsilon_r$ . Na ploše membrány je náboj  $Q$ , na povrchu pevné elektrody je hustota náboje  $\delta_x$ ,  $d_0$  je klidová vzdálenost membrány od pevné elektrody a  $\eta$  průhyb, který je funkcí času a plošných souřadnic. Mezi membránou a pevnou elektrodou je signálové napětí  $u(t)$ . V [8] je podrobně odvozen vztah pro tlak

$$p = k_\beta u + \frac{1}{j\omega c_\beta} W.$$

Analogické schéma elektretového měniče je shodné jako u elektrostatického s vnější polarizací, rozdíl je pouze v tom, že  $k_\beta$  má jinou hodnotu

$$k_\beta = \frac{\delta d_e}{\epsilon_r d^2}.$$

Elektretové mikrofony jsou poměrně nenáročné na výrobu a výrobcům se daří dosahovat příznivých cen. Většina mikrofonních vložek elektretových mikrofونů má vestavěn tranzistorový FET zesilovač, který přizpůsobuje jejich velmi vysokou impedanci a zesiluje signál [13].

### 2.1.2 Nízkofrekvenční zesilovače

Úkolem při návrhu a konstrukci vstupního zesilovače je zesílit signál z mikrofону na velikost požadovanou k regulaci úrovně, korigovat kmitočtový průběh zdroje signálu, není-li tento zdroj svým principem lineárním převodníkem, dále vhodně impedančně přizpůsobit zdroj signálu a zpracovat vstupní signál v celém rozsahu

dynamiky bez zkreslení. Přitom je třeba dosáhnout minimálního vlastního šumu zesilovače a stabilního zesílení bez záskmitů.

Vzhledem k velmi pokročilému stupni integrace obvodů zesilovačů a velkému rozsahu problematiky jejich návrhu není v této části textu tomuto tématu věnován větší prostor.

## **2.2 Měření akustického tlaku**

V dnešní době v praxi měříme akustický tlak tlakovými měřicími mikrofony. Při použití mikrofونů je třeba dbát na to, v jaké poloze vzhledem k dopadajícím akustickým vlnám byly cejchovány a jak mají být v měřeném akustickém poli umístěny. To je nutné, protože v oblasti kmitočtů, kdy je délka vlny srovnatelná s rozměry mikrofону, nastává v místě mikrofону deformace akustického pole, která způsobuje zvýšení akustického tlaku na povrchu tělesa ze strany dopadajících vln. Odpovídá-li směr osy válce směru postupujících vln, nastává vzestup akustického tlaku pro kmitočty, jejichž délka je srovnatelná s průměrem a to až o 10 dB, je-li průměr roven vlnové délce. Naproti tomu při směru osy kolmé na směr postupujících vln zůstává akustický tlak na základně válce prakticky konstantní. To platí ovšem pouze pro ideální případ, kdy membrána mikrofону tvoří základnu válce. Ve skutečnosti nastává určitá změna akustického tlaku v závislosti na kmitočtu i u takto směřovaného mikrofону. Je tedy zřejmé, že k měření akustického tlaku můžeme použít jakéhokoli typu tlakového mikrofону, známe-li jeho kmitočtovou charakteristiku a jsou-li jeho vlastnosti dostatečně stálé.

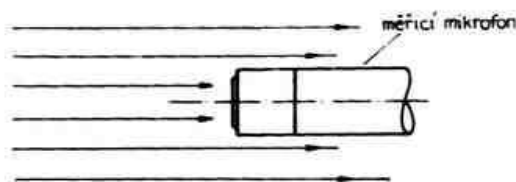
Vyžaduje-li se velká přesnost měření, používá se obvykle kondenzátorových tlakových mikrofонů. Předností kondenzátorového mikrofону je jeho stálost a možnost snadného cejchování.

### **2.2.1 Měření akustického tlaku v akustických polích**

Při měření akustického tlaku se zpravidla rozlišuje, zda jde o měření ve volném poli nebo o měření, kdy se zjišťuje skutečný tlak na membráně mikrofону nebo jeho přibližně střední hodnota po ploše membrány v oblasti vyšších kmitočtů. Měření akustického tlaku v druhém z uvedených případů bývají označována jako tlaková měření v užším smyslu. Zpravidla se také rozlišují měřicí mikrofony pro volné pole a měřicí mikrofony pro tlaková měření.



Měřicí mikrofony pro měření ve volném poli se konstruuují nejčastěji tak, že se počítá se vzestupem akustického tlaku na membráně mikrofonu v poli postupných vln při orientaci mikrofonu proti směru šíření měřeného signálu. Zpravidla se předpokládá, že bude mikrofón umístěn v poli rovinných vln s membránou orientovanou svojí plochou kolmo na směr šíření rovinných vln proti zdroji, z něhož se vlny šíří (obr. 11)



**Obr. 11: Orientace mikrofónu**

Kromě kmitočtové charakteristiky pro orientaci mikrofónu s osou směřující ke zdroji zvuku se také udávají kmitočtové charakteristiky pro různá natočení mikrofónu v závislosti na úhlu mezi osou mikrofónu a směrem šíření vln, resp. mezi osou mikrofónu a spojnicí středu membrány se středem zdroje měřicího signálu. Pro měření v dozvukových komorách se také udává kmitočtová charakteristika mikrofónu platná pro difúzní akustická pole.

## **2.3 Zpracování signálů v číslicových analyzátorech**

Nepostradatelnou nedílnou součástí zařízení pro měření hluku jsou systémy pro zpracování naměřených hodnot, které v dnešní době představují prakticky výhradně číslicové analyzátory. Číslicové analyzátory jsou vybavené potřebnými A/D a D/A převodníky, číslicovou filtrací měřeného signálu a systémy průměrování naměřených spekter měřeného signálu, které současně nabízejí zobrazení naměřených a vypočtených hodnot, údajů, spekter. Vzorkování a kvantování měřeného signálu, jeho zpracování ve filtrech a zobrazení je dostatečně rychlé, aby bylo možné sledovat vývoj měření. Z tohoto důvodu hovoříme o tom, že pracují v reálném čase, jsou to tedy analyzátory v reálném čase.

### **2.3.1 Kmitočtové analyzátory**

U signálu lze snímat souhrnné charakteristiky nebo frekvenční spektra. Souhrnnou charakteristikou je např. hladina hluku. Tato hladina je efektivní hodnotou signálu. Měření celkové hladiny akustického tlaku poskytuje velmi zjednodušené informace, které mohou vést až k mylné představě o měřeném hluku. Toto omezení je

překonáno tím, že se provede kmitočtová analýza hluku tzv. kmitočtovým analyzátozem. Frekvenční spektrum, zkráceně označujeme jen slovem spektrum, představuje velmi zjednodušeně podíl „čistých“ tónů ve hluku nebo jinak také harmonických složek v obecném signálu. Spektrum je funkcí frekvence a podle matematické definice je to obecně spojitá funkce. V minulosti se k vyhodnocení spektra používaly frekvenčně selektivní voltmetry, tj. klasické voltmetry s pásmovou propustí – filtrem. Střední frekvence pásmového filtru se nastavovala skokově nebo byla plynule přeladována. Výstupem měření byly izolované hodnoty spektra z frekvenční osy nebo spojitá funkce s vyhlazeným průběhem podle selektivity filtru, který nelze z principiálních důvodů navrhnout jen pro jedinou frekvenci, tj. s téměř nulovou šířkou přenášeného frekvenčního pásma. Takto však není možné zjistit přesně celý spojitý průběh spektra, ale pouze jeho diskrétní aproximaci, tzv. složky spektra, pro souvisle navazující dílčí pásma, jejichž souhrn tvoří rovněž omezené frekvenční pásmo, jehož šířka závisí na vzorkovací frekvenci.

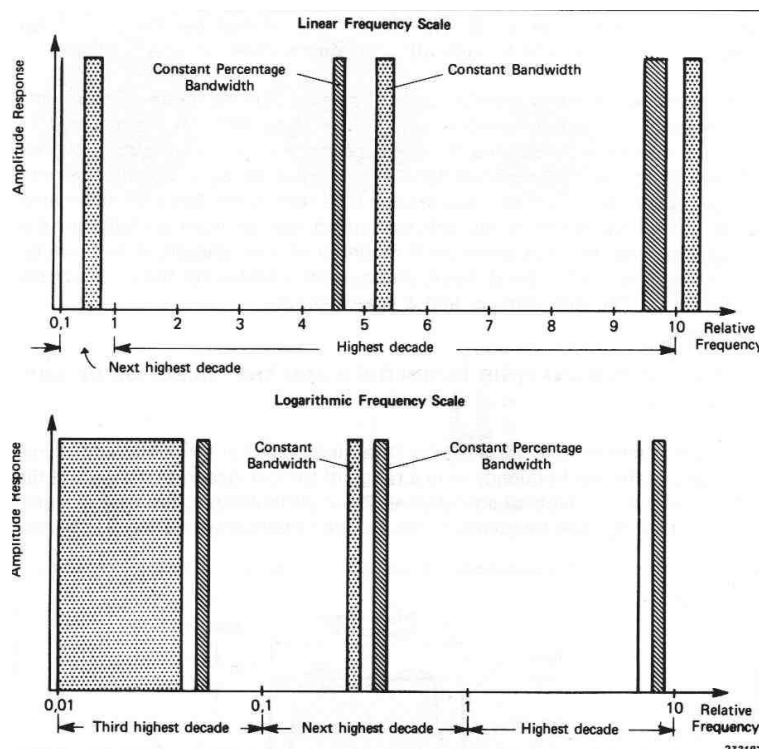
Frekvenčními filtry lze v reálném čase přímo vyhodnotit úroveň jednotlivých složek z jistého frekvenčního rozsahu tím, že ostatní složky spektra jsou potlačeny. U fyzikálně realizovatelných filtrů časového průběhu signálu neexistuje jediná hraniční frekvence mezi propustným a nepropustným pásmem frekvencí, ale celé přechodové pásmo. Pro další úvahy lze zjednodušeně předpokládat ideální filtr bez přechodového pásma, tj. se spodní,  $f_s$  a horní,  $f_h$ , mezní frekvencí. S jejich pomocí lze definovat absolutní šířku propustného pásma,  $\Delta f = f_h - f_s$  nebo relativní šířku  $\Delta f / f_c$

Vzájemný vztah mezi šířkami dílčích pásem frekvenčního rozsahu spektra určuje dvě základní skupiny analyzátorů, a to s

- konstantní relativní šířkou pásma, tzv. CPB (Constant Percentage Bandwidth) analyzátozy, které charakterizuje logaritmická frekvenční osa
- konstantní absolutní šířkou pásma, jejichž nejrozšířenějším typem jsou tzv. FFT (Fast Fourier Transform) analyzátozy, které charakterizuje lineární frekvenční osa.

Střed propustného pásma u analyzátorů s konstantní relativní šířkou pásma (CPB) je definován geometrickým průměrem horní a dolní mezní frekvence  $f_c = \sqrt{f_h f_s}$  a u analyzátorů s konstantní absolutní šířkou pásma (FFT) představuje

střed pásma aritmetický průměr těchto frekvencí  $f_c = (f_h + f_s)/2$ . Rozdílnost obou typů je znázorněna na Obr. 12 podle [17].

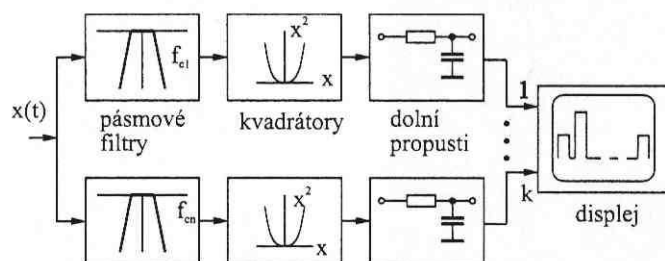


Obr. 12: Rozdíl mezi analýzou s konstantní šířkou pásma a CPB

### 2.3.1.1 Analyzátoři s konstantní poměrnou šířkou pásma (CPB)

Konstrukce analogových nebo číslicových filtrů umožňuje snadno realizovat celou skupinu filtrů s podmínkou, že relativní šířka pásma je konstantní. Vzdálenost středních frekvencí sousedních pásem je volena jedna oktáva nebo zlomek oktávy (oktáva označuje interval mezi dvěma tóny, jejichž kmitočet je právě dvojnásobný). Střední a mezní frekvence sousedních pásem se liší o násobek  $\sqrt[n]{2}$ . Spektra s odstupem středních frekvencí, který je dán zlomkem  $1/n$  jsou označována jako  $1/n$ -oktávová spektra, kde  $n$  je voleno nejčastěji 1, 3, 6, 12, 24, což odpovídá spektrům 1/1, 1/3, ... oktávy, přičemž některé analyzátoři dovolují zvolit relativní šířku pásma i mimo celočíselné hodnoty parametru  $n$ . Analyzátoři založené na tomto principu jsou nazývány také Real Time (RT) analyzátoři. Nejstarší označení je přímo podle šířky propustného pásma, tj. např. 1/3-oktávový analyzátor. Logaritmická stupnice pro frekvenci u CPB analyzátorů dává při znázornění ve sloupcovém grafu konstantní rozmístění jednotlivých složek spektra.

Moderní CPB analyzátory jsou řešeny výhradně s číslicovými filtry, blokové schéma je na Obr. 13 podle [9] Každý kanál analyzátoru realizuje měření výkonu signálu v přenosovém frekvenčním pásmu filtru. Výkon signálu je dán jeho druhou mocninou. Na displeji analyzátoru je znázorňována průměrovaná hodnota tohoto výkonu. Průměrování je v blokovém diagramu znázorněno symbolicky dolnoproústným RC filtrem. Ve skutečnosti je obvykle voleno exponenciální nebo lineární průměrování.



Obr. 13: CPB frekvenční analyzátor

CPB analýza není transformací, neexistuje pro ni teoretický podklad přímou matematickou definicí. Popis se proto opírá o syntézu ze známých metod. Používané jsou dvě cesty. První staví na idealizovaném modelu s exponenciální bankou pásmových propustí, což je model prosazovaný v analyzátoch Brüel & Kjaer. Druhá staví na syntéze z kaskádní FFT a je užívaná např. firmou National Instrument.

### 2.3.1.2 Analyzátory s konstantní absolutní šířkou pásma (FFT)

V mnoha případech zejména diagnostických je výhodné, aby analyzátor pracoval v celém frekvenčním rozsahu s konstantní, často velmi malou šířkou pásma. Přeladitelný analogový nebo číslicový filtr pro reálný čas s takovou selektivitou nelze navrhnout. Objev rychlé Fourierovy transformace však situaci změnil, proto spektrum s konstantní šířkou pásma lze vypočítat Fourierovou transformací [9].

### 2.3.2 Průměrování spekter

Při zpracování signálů v analyzátoch jsou vždy přítomny určité fluktuace způsobující, že v odhadech spekter jsou chyby a jejich tvar není vyhlazen. Chyby odhadů se redukuje výpočtem průměru s cílem získat co nejrepresentativnější odhad. V souvislosti s vyhodnocováním spekter se hovoří o průměrování (angl. averaging) jednotlivě vypočtených spekter. Pro průměrování je třeba postupně vyhodnotit výkonové spektrální hustoty, které jsou rozlišeny indexem,  $t$ . Jedno spektrum o počtu

složek  $N_{lin}$  a s pořadím měření,  $t$ , lze uspořádat do vektoru  $[psd_{0,t}, psd_{1,t}, psd_{2,t}, \dots, psd_{N_{lin},t}]$ . Jednotlivé složky výkonové spektrální hustoty s pořadím  $t$  jsou dány čtvercem koeficientů DFT, tj.  $|X_{t,i}|^2$ . Průměrování počtu  $K$  záznamů se pak uskutečňuje podle vzorce

$$PSD_{i,K} = \frac{1}{K} \sum_{t=1}^K psd_{i,t}, i = 0, \dots, N_{lin}. \text{ Tento vzorec předpokládá udržovat v paměti}$$

$K(N_{lin}+1)$  čísel, což je nevýhodné, ve skutečnosti je průměrování podle rekursivního vzorce

$$PSD_{i,t} = \frac{t-1}{t} PSD_{i,t-1} + \frac{1}{t} psd_{i,t}, t = 1, \dots, K, i = 0, \dots, N_{lin}.$$

Tato varianta vzorce ve tvaru váženého průměru odpovídá v signálových analyzátoch firmy Brüel & Kjaer filtraci typu LIN. Průměrování spekter se zastaví po vyhodnocení počtu  $K$  spekter.

Jestliže po dosažení počtu spekter  $t = K$  při průměrování se rekursivní vzorec změní na tvar s konstantními koeficienty

$$PSD_{i,t} = \frac{K-1}{K} PSD_{i,t-1} + \frac{1}{K} psd_{i,t}, t = K+1, K+2, \dots, i = 0, \dots, N_{lin} \text{ a průměrování}$$

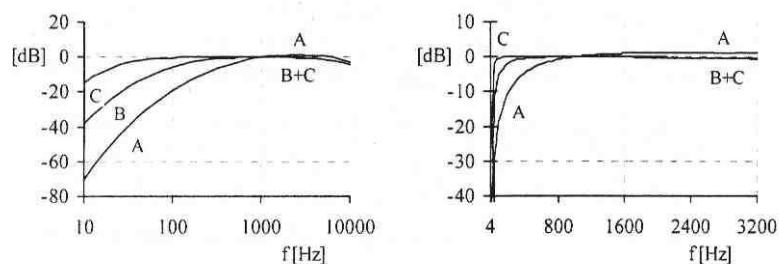
pokračuje bez přerušení dále, pak se jedná o variantu filtrace typu EXP. Rovnice má tvar lineárního filtru prvního řádu s konstantními koeficienty [9].

### 2.3.3 Akustické vážení

Fyziologické vnímání hluku lidskými smysly není na všech frekvencích a amplitudách harmonických složek akustického tlaku (čistých tónech) stejně citlivé. To znamená, že efektivní hodnota akustického tlaku, která je vnímána se stejnou hlasitostí, není pro různé frekvence konstantní. Hlasitost se hodnotí jednotkami, které se nazývají fóny. Čistý tón o hlasitosti např. 40 fónů vnímá člověk s průměrnou citlivostí sluchu stejně jako referenční čistý tón o frekvenci 1 kHz a efektivní hodnotě akustického tlaku 40 dB. Pro čisté tóny o referenční frekvenci, tj 1 kHz a o různé amplitudě se fóny a decibely číselně shodují. Práh slyšitelnosti proto odpovídá 0 fónů.

Měřicí mikrofony zaznamenávají složky spektra se stejnou citlivostí ve velmi širokém rozsahu frekvencí. Aby efektivní hodnota, kterou stanoví analyzátor, odpovídala citlivosti lidského sluchu, je třeba spektrum korigovat tzv. frekvenční vahou.

Zmíníme tři typy vah, a to A, B, C. Frekvenční váha typu A odpovídá hlasitosti na úrovni 40 fónů, váha B přísluší 70 fónům a C je pro 100 fónů. Váhové křivky byly získané na základě hrubé aproximace frekvenční závislosti citlivosti lidského sluchu v různých dynamických oblastech poslechu [15]. Frekvenční váhu je možné považovat za frekvenční filtr, který ovlivní definovaným způsobem spektrum hluku. Frekvenční charakteristiky těchto filtrů jsou na Obr. 14 podle [9].



Obr. 14: Frekvenční váhy typu A, B, C v lineárních a logaritmických souřadnicích

Celková efektivní hodnota hluku po korekci některou uvedenou váhou je vhodnější srovnávací kritérium než je efektivní hodnota akustického signálu bez úprav. Ze tří uvedených vah je nejběžněji hygienickými předpisy pro limitování hladiny hluku vyžadováno použití frekvenční váhy typu A. [9]

### 3. Konstrukce mikrofonní sondy

V této části textu bude osvětlen návrh jednoduchého systému mikrofonní sondy. Konstrukce byla pojata modulárním způsobem, každý blok reprezentuje jednu část elektroakustického řetězu, podle již zmíněných zásad.

#### 3.1 Elektroakustický měnič – mikrofon

Vstupním zařízením umožňujícím další zpracování zvuku je detektor změn akustického tlaku, mikrofon. Volba mikrofonu je pro každou aplikaci primární úlohou a do značné míry ovlivňuje chování celého zařízení. V našem případě byl však výběr značně zjednodušen aplikačními požadavky. Sonda musí mít zejména malé rozměry, musí být dostatečně robustní s ohledem na předpokládané použití zkoumání zdrojů hluku v malých prostorách. Současně je nutné zvážit potřebnou úroveň kvality přenosu signálu v souladu s pořizovací cenou. Vhodným hlediskem pro výběr mikrofonu může být i jeho směrovost vyhovující požadavkům na schopnost zkoumání hluku za přítomnosti provozních hluků při provozu vozidla. Bohužel nabídka mikrofonních

vložek dostupných na trhu s elektronickými součástkami je velmi omezená, není tedy možné zohlednit veškeré aspekty pro výběr. Zásadním faktorem pro použitelnost sondy jsou její minimální rozměry, což splňuje bezvýhradně pouze elektretová mikrofonní vložka. Vítaná je i velice nízká cena této technologie. Princip funkce elektretového mikrofonu byl popsán již v teoretické části, zde následují aplikační požadavky.

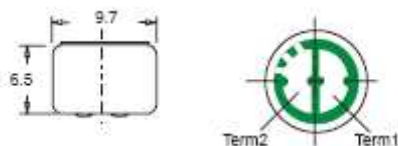
### **3.1.1 Napájení mikrofonu**

Elektretový mikrofon může být velmi citlivý, stálých vlastností, má velmi malé rozměry a nízké nároky na napájení. V dnešní době jsou elektretové mikrofony nejpoužívanějším typem měniče používaných v klopových mikrofonech, videokamerách, mobilních telefonech apod.

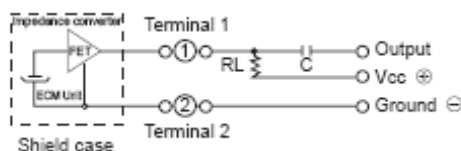
V případě elektrostatického kondenzátorového mikrofonu je nutno přivést napětí pro vytvoření elektrického pole v měniči. Elektretový mikrofon potřebuje výrazně menší napětí, které je použito pouze pro napájení vestavěného tranzistoru FET. Typická elektretová vložka je dvouterminálová a přibližuje se chování zdroje proudu při napájení napětím 1 – 9 V. Spotřebuje zpravidla méně než 0,5 mA, což je spotřeba velmi malého vestavěného předzesilovače, který provádí konverzi velmi vysoké impedance zdroje elektretového elementu.

Zatěžovací rezistor určuje impedanci, která je obvykle 1 – 10 k $\Omega$  a může být přizpůsobený zesilovači. Spodní limit je určen napěťovým šumem zesilovače a horní limit interferenčním zdvihem (a proudovým šumem zesilovače). Vhodné hodnoty odporu jsou typicky v rozmezí 1 – 10 k $\Omega$ . V mnoha případech je mikrofon napájen zdrojem napětí 1,5 – 5 V přes rezistor odporu řádu kiloohmů. Vzhledem k tomu, že elektret sám obsahuje malý vyrovnávací zesilovač, který zvyšuje šum, je časté určit odstup signálu od šumu (SNR – signal to noise ratio, obvykle při 94 dB SPL) nebo tvar vlastního šumu, který je ekvivalentní hladině akustického šumu, obvykle mezi 20 – 30 dB SPL. Elektret potřebuje napájení, v důsledku vestavěného FET zesilovače uvnitř mikrofonní vložky. Napájecí napětí by mělo být dodrženo čisté, neboť tento šum bude přenesen na výstup mikrofonu. [10]

Z nabídky firmy GM Electronic byla zakoupena elektretová mikrofonní vložka s označením CZ034. Jedná se o všesměrový (angl. omnidirectional) mikrofon malých rozměrů (Obr. 15). Vnitřní uspořádání a způsob připojení do obvodu je schématicky naznačeno na Obr. 16.



Obr. 15: Rozměry a označení elektretové mikrofonní vložky CZ034



Obr. 16: Schématické znázornění vnitřního zapojení CZ034

Udávané parametry jsou:

- frekvenční rozsah: 50 – 10000 Hz
- citlivost: 5,6 mV / Pa / 1 kHz
- výstupní impedance: 2 k $\Omega$
- spotřeba: méně než 500  $\mu$ A
- obvyklé provozní napětí: 4,5 V
- odstup signál / šum: více než 34 dB
- vazební kondenzátor: 0,1 – 4,7  $\mu$ F

Rezistor je v obvodu nutný pro oddělení napájecího napětí od výstupního signálu, vykazuje malou indukční složku, která zajišťuje toto oddělení, zároveň změkčí napájecí napětí, funguje tedy jako ochrana mikrofonu.

### 3.2 Předzesilovač

Přestože mikrofonní vložka má integrovaný jednoduchý zesilovač, úroveň signálu získaného z mikrofonu je nízká, musí se provést jeho zesílení na takovou úroveň, která je potřebná pro koncový zesilovač nebo pro záznam.

Předzesilovače je možné, podobně jako koncové zesilovače, sestavit z diskrétních součástek, ovšem vzhledem k možnostem integrace je dnes výrazně rozšířenější realizace pomocí integrovaných obvodů. Pro srovnání chování byl sestaven jednoduchý tranzistorový zesilovač, větší pozornost pak byla věnována výběru a použití integrovaného obvodu předzesilovače.



### 3.2.1 Tranzistorový předzesilovač

Jedná se o klasický dvoustupňový tranzistorový zesilovač. Stejnosměrné napájecí napětí pro mikrofon zajišťuje odpor R1, hodnota  $1\text{ k}\Omega$  se doporučuje pro většinu běžných mikrofonů. Na tomto odporu se současně snímá užitečný signál z mikrofonu. Ten je přes oddělovací kondenzátor C1 přiveden na bázi prvního tranzistoru T1. Emitorový odpor R2, sloužící pro stabilizaci stejnosměrného pracovního bodu, je pro střídavý signál blokován kondenzátorem C2. Z kolektorového odporu prvního tranzistoru je signál přiveden na druhý tranzistor T2. Ten je zapojen jako emitorový sledovač. Odporem R4 je zavedena stejnosměrná zpětná vazba na vstup tranzistoru T1. Výstupní signál je odebírán přes oddělovací kondenzátor C4. [11] Tranzistory jsou typu BC550 s vodivostí typu NPN, které mají s nízkou úrovní vlastního šumu.

Popsané zapojení bylo sestaveno na desce nepájivého kontaktního pole, další pozornost mu však věnována nebyla.

### 3.2.2 Korekční předzesilovač

Zesilovače napětí lze rozdělit podle charakteru obvodu na zesilovače s lineární přenosnou charakteristikou a zesilovače korekční.

Alternativně ke konstrukcím nízkofrekvenčních zesilovačů z diskrétních součástek je k dispozici ve velkoobchodech velmi široké spektrum integrovaných obvodů realizujících mnohdy i pokročilejší funkce. Základními integrovanými obvody používanými pro konstrukci nízkofrekvenčních zesilovačů jsou operační zesilovače a na trhu jsou k dispozici ve velkém množství typů. Možnosti jejich použití jsou velice rozmanité.

Další možností, jak vyřešit návrh jednoduchého zesilovače nabízejí výrobci elektronických součástek v podobě monolitických integrovaných zesilovačů. Jejich výběr je široký pro většinu aplikací. Takovéto integrované obvody je nutné doplnit vnějšími součástkami, které slouží pro nastavení nebo jsou jednoduše nezbytné pro funkci zapojení, ale nejdou vyrobit běžnou technologií. Struktura integrovaného obvodu předurčuje jeho zapojení, proto je návrh značně zjednodušen oproti návrhu s klasickými zesilovacími prvky. Výrobce předepisuje četná doporučení, která jsou často závazná pro činnost integrovaného obvodu jako celku a v aplikačních poznámkách udává soubor různých zapojení. Z tohoto souboru je potom zvoleno nejvhodnější zapojení. Vhodné je

z hlediska napěťové a výkonové zatížitelnosti integrovaných obvodů používat stabilizační obvody.

Takovéto obvody jsou schopny kromě základní funkce zesílení vstupního signálu poskytnout i prostředky pro další operace. Pro naši aplikaci bylo výhodné mít možnost v průběhu nastavení obvodu upravit tvar frekvenční charakteristiky, což umožňují integrované korekční předzesilovače. Byl vybrán obvod TDA1524A od firmy Philips. Jedná se o typicky jednoúčelový integrovaný obvod, pro který je výrobcem předepsáno úplné zapojení, na kterém není třeba téměř nic měnit. Přestože se předpokládá jeho použití pro stereofonní aplikace, není tento fakt na závadu, neboť koncovým zařízením sondy budou stereofonní sluchátka, jejichž nabídka je širší než monofonních.

Korekční předzesilovač s obvodem TDA1524A dovoluje řízení výšek, hloubek, stereováhy a fyziologické řízení hlasitosti. Poslední jmenované má však pro sondu zanedbatelný význam, úprava hlasitosti bude umožněna nastavením výstupního zesilovače. Všechny popsané funkce jsou v obvodu řízeny elektronicky, ovládají se pouze stejnosměrným napětím jednoduchým potenciometrem. K obvodu je připojeno minimum externích součástek pro korekční obvody. Schéma zapojení je na obr. Vstupní signál se přivádí přes kondenzátory C1 a C2, které oddělují stejnosměrné vstupy integrovaného obvodu. Hlasitost, hloubky, výšky a stereováha se nastavuje potenciometry P1 až P4, které jsou napájeny stejnosměrným napětím z vývodu 17 integrovaného obvodu. Řídicí napětí se odebírá z běžců potenciometrů. Kondenzátory zapojené mezi běžce potenciometrů a zem chrání vstupy před případným praskáním. V našem případě bude provedeno pevné nastavení úrovně odporovými trimry a tato vlastnost tedy není důležitá. Kondenzátory C3 až C8 spolu s odpory R1 a R2 doplňují interní korekční obvod. Napájecí napětí je filtrováno kondenzátorem C10. Výstupy obvodu jsou opět stejnosměrně odděleny kondenzátory C15 a C16. Odpory R4 a R5 tvoří ochranu obvodu při případném zkratu na výstupu. Výstupní signály obou kanálů jsou pak přivedeny na konektory typu jack 3,5 mm a je tak umožněno například nahrávání signálu před zesílením pro sluchátka výstupním zesilovačem; dále jsou pak přes potenciometr jsou přivedeny výstupy na vstupy výstupního zesilovače.

Obvod korektoru můžeme napájet stejnosměrným napětím 7,5 V až 16 V. Proudová spotřeba je podle napájecího napětí v rozmezí od 25 mA do 65 mA, typicky 35 mA. Vstupní napětí pro výstup 700 mV je od 70 mV do 1,4 V. Maximální efektivní

výstupní napětí je 1,4 V. Při použití musíme tedy dbát na správnou úroveň signálu, aby na výstupu nedocházelo k limitaci a tudíž nárůstu zkreslení. Regulace hlasitosti pracuje od  $-80$  dB do  $+20$  dB. Zdvih/potlačení hloubek je  $\pm 16$  dB, výšek  $+22/-40$  dB. Stereováhu můžeme řídit v rozsahu  $\pm 40$  dB. Harmonické zkreslení je  $<0,1$  % při kmitočtu 1 kHz. Přeslechy mezi kanály jsou lepší než 60 dB, zaručovaný souběh obou kanálů je lepší než 1,5 dB.

### **3.3 Výstupní zesilovač**

Konečné přizpůsobení signálu pro sluchátkový výstup je provedeno opět integrovaným zesilovačem. Používaným řešením je sluchátkový zesilovač TDA7050 firmy Philips v zapojení doporučeném výrobcem.

### **3.4 Napájení obvodu**

Návrh napájení vychází z velikostí napájecích napětí jednotlivých prvků řetězce a je v souladu s požadavky zadavatele na bateriové napájení s možností připojení do palubní sítě automobilu. Použita je běžná NiCd baterie 9 V. Přes odpor je napájen mikrofon a obvod předzesilovače. Použití obvodu TDA7050 si vynutilo stabilizaci napájecího napětí stabilizátorem 78L05 na napětí 5 V, obvod je totiž dimenzován na maximální napájecí napětí 6 V. Připojením přístroje do palubní sítě automobilu je přes diodu omezeno napájení z baterie a přivedeno na vstup stabilizátoru 78L09, aby bylo dosaženo stejné úrovně napájecího napětí jako v případě použití baterie.

## **4. Návrh desky plošných spojů**

Návrh desky plošného spoje je proveden v návrhovém systému EAGLE ve volně šiřitelné verzi 4.16 Light.

### **4.1 Návrhový systém EAGLE**

Návrhový systém EAGLE je složen ze třech modulů, Library, Schematic a Board, které jsou navzájem propojeny a umožňují pohodlný návrh desky plošného spoje. Ovládání programu není složité, vyžaduje však znalost určitých empirických pravidel.

### 4.1.1 Modul Library

Tvorbu návrhu desky nutné začít tvorbou knihovny součástek. V modulu *library* definujeme součástky, jaké budou použity. Zatímco schématické značky (*symbol*) je třeba zpravidla ručně nakreslit, pouzdra součástek (*package*) lze ve většině případů zkopírovat z implementovaných knihoven programu. Jednoduchým způsobem pak vytvoříme zařízení (*device*) propojením schématické značky a *pinů* pouzdra.

### 4.1.2 Modul Schematic

V modulu *Schematic* vytvoříme schéma celého zapojení obvodu na základě doporučených zapojení výrobce a podle doplnění popsanych v bodě 3. Součástky vkládáme z předem vytvořené knihovny, zakreslíme elektrické propojení pomocí funkce *Net*. Správnost elektrického zapojení navrženého schématu je možné nechat zkontrolovat pomocí funkce *Erc – Electrical Rule Check* a opravit případné chyby.

### 4.1.3 Modul Board

Při přepnutí do modulu *Board* potvrdíme dotaz, zda žádáme vytvořit desku ze schématu a přistoupíme k vlastnímu návrhu konečné podoby desky plošného spoje. Rozmístěním součástek zjistíme přibližnou limitaci velikosti desky a můžeme ji upravit na požadované rozměry. Návrhový systém sice nabízí funkci *Autorouter*, tedy automatický návrh vedení signálových cest. Takové provedení je ovšem prakticky téměř nepoužitelné, pro dosažení efektivního návrhu je nutné provést ruční spojování. Tento postup je sice časově velmi náročný, ale nutný. Vhodným ulehčením se v určitých případech může stát kombinace obou uvedených metod.

V této části je možné provést další kontrolu návrhu funkcí *DRC – Design Rule Check*, která odhalí případné porušení návrhových pravidel.

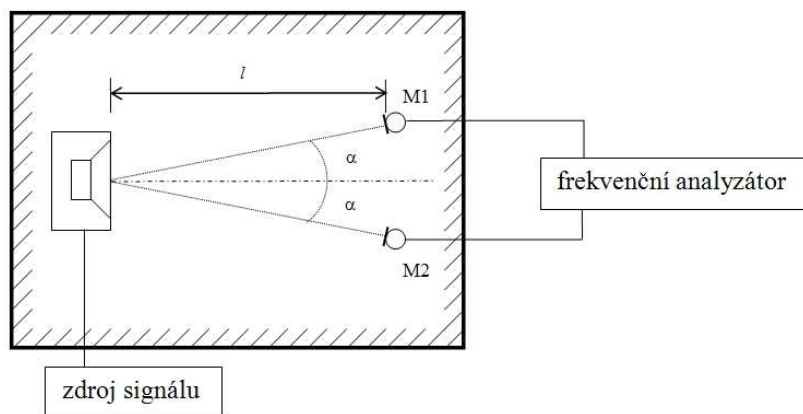
Bylo docíleno provedení na jednovrstvé desce rozměrů  $72 \times 60$  mm, při dodržení zásady dostatečné vzájemné vzdálenosti a minimální délce signálových cest a maximální možné vzdálenost mezi výstupními a napájecími oddíly. Signálová zem je v provedení rozlévaná mědi, jiné řešení by vyžadovalo vedení signálů ve více vrstvách.

## 5. Měření charakteristik mikrofonu

Vlastnosti mikrofonů jsou charakterizovány jejich citlivostí, závislostí na kmitočtu, směrovou charakteristikou a výstupní impedancí. Vzhledem k omezené vybavenosti pro přesné měření charakteristik elektroakustických měničů budou v této práci určeny zejména kmitočtová charakteristika a směrová charakteristika mikrofonu.

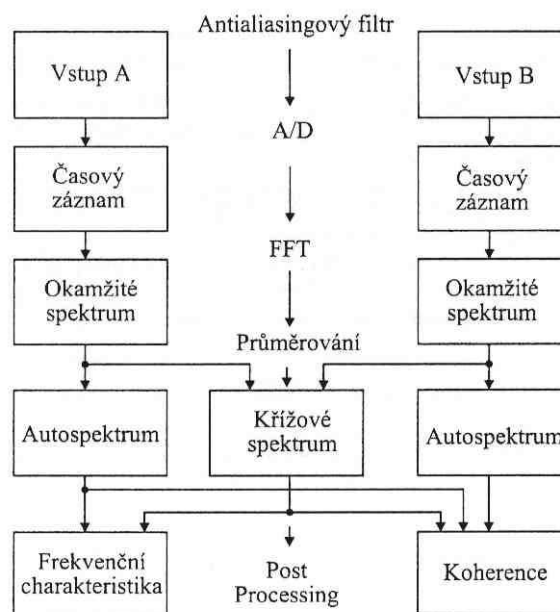
### 5.1 Měření kmitočtových charakteristik

Kmitočtové charakteristiky se zpravidla měří v uspořádání naznačeném na Obr. 17 podle [5]. V bezodrazové komoře je umístěn zdroj signálu, měřicí mikrofon a měřený mikrofon. Zdrojem měřicího signálu je širokopásmový reproduktor a dostatečně širokou směrovou vyzařovací charakteristikou. Oba mikrofony jsou umístěny ve stejné vzdálenosti od reproduktoru a také ve stejné nepříliš velké vzdálenosti od akustické osy reproduktoru. Kmitočtové charakteristiky mikrofonů běžných konstrukcí se měří v rovinné vlně. Proto musí být vzdálenost mezi zdrojem a mikrofony rovna nejméně polovině jedné vlnové délky odpovídající měřicímu signálu s nejnižším kmitočtem a zároveň také rovna nejméně pětinasobku rozměrů zdroje měřicího signálu.



Obr. 17: Uspořádání pro měření kmitočtových charakteristik

Výpočet frekvenční charakteristiky se uskutečňuje vícekanálovým analyzátozem, jehož blokové schéma je na Obr. 18.



**Obr. 18: Blokový diagram dvoukanálového FFT analyzátoru**

Měření záznamů o konečné stejné délce vede ke vzorkování, tj. k diskretizaci obrazů vstupního a výstupního signálu a tím také frekvenčního přenosu na jednotlivé přenosové součinitele pro jednotlivé frekvence harmonického signálu na vstupu a výstupu soustavy. Přenosový činitel je komplexní číslo, proto obsahuje nejen informaci o modulu přenosu, ale i o fázovém posunu mezi oběma harmonickými signály. Přenosovou funkci lze odhadnout jednoduchým výpočtem z podílu dvou komplexních čísel v rozsahu indexu  $k = 0, \dots, N/2$ , kde  $N$  udává délku vstupních a výstupních záznamů DFT:

$$H_k = \frac{Y_k}{X_k}.$$

Vyhodnocení přenosových funkcí je založeno na opakovaném měření budicího signálu a odezvy. Celé podrobné odvození výpočtu přenosu je uvedeno v [9]. Výsledkem jsou hodnoty přenosové funkce

$$H1_K = \frac{\sum_{m=1}^M Y_{k,m} X_{k,m}^*}{\sum_{m=1}^M X_{k,m} X_{k,m}^*}, \quad k = 0, 1, \dots, N/2.$$

Čitatel výrazu je komplexní číslo, zatímco jmenovatel je číslo reálné, kladné. Stejně jako při měření a vyhodnocování spekter je použito průměrování ke zpřesnění odhadu frekvenční charakteristiky, protože přenos se obecně určuje z většího počtu

měření. Jmenovatel přenosu je úměrný průměrované výkonové spektrální hustotě a čítec průměrovanému křížovému spektru. Ve odvození výše uvedeného vzorce pro výpočet frekvenční charakteristiky bylo předpokládáno, že její výstupní signál je ovlivněn aditivním šumem. Je proto možné také předpokládat, že chyba měření se projevuje u vstupního signálu a výstupní signál je měřen přesně.

V analyzátoch je možné provést také výpočet přenosové funkce značené indexem 2, tj.  $H_2$ , pro aditivní chybu měření na vstupu systému. Vzorec pro výpočet je následující

$$H1_k = \frac{\sum_{m=1}^M Y_{k,m} Y_{k,m}^*}{\sum_{m=1}^M X_{k,m} Y_{k,m}^*}, k = 0, 1, \dots, N/2.$$

Dále je uváděna ještě frekvenční charakteristika označená indexem 3, která je geometrickým průměrem obou vypočtených charakteristik.

## 5.2 Měření směrových charakteristik

Směrové charakteristiky mikrofону lze zjistit jeho natáčením kolem osy a zapisováním průběhu výstupního napětí v závislosti na úhlu, který svírá osa mikrofону se směrem šíření akustického signálu. [12] Zjišťují se ve volném prostoru v rovinné vlně buď pro diskrétní kmitočty, nebo zvolená kmitočtová pásma. Podle toho je měřicí signál buď jednoduchý signál harmonický, nebo pásmo bílého nebo růžového šumu.

## 5.3 Multianalyzátor PULSE

Měření a analýza signálů se stala v rozmachem číslicového zpracování z praktického pohledu poměrně snadnou záležitostí, většina problémů je řešena softwarově s podporou kvalitního hardware. Měření analogovými přístroji vyžadovalo součinnost několika zařízení, dnes je systém měření složen z kompaktního modulů a počítače.

V této části textu bude prezentována práce se zařízeními pro měření v oblasti akustiky a vibrací, které bude použito pro změřených charakteristik navržené sondy. Jedná se o produkty firmy Brüel & Kjaer, multianalyzátor PULSE a měřicí mikrofóny B&K 4189.

Mezi celosvětovou špičku v oblasti měření a analýzy zvuku a vibrací již mnoho let patří dánská firma Brüel & Kjaer, která v současné době nabízí systém multianalyzátoru založeného na platformě osobního počítače s názvem PULSE. Jeho použití zjednodušuje celý průběh měřicího procesu, ovládání je logické, obvyklé u běžných programů v prostředí operačního systému Windows.



**Obr. 19: Front-end jednotka multianalyzátoru PULSE 3560C**

Multianalyzátor PULSE se skládá ze dvou částí, hardwarové jednotky (Obr. 19) a software nainstalovaném na poměrně výkonném osobním počítači. Hardwarový modul je s PC spojen pomocí ethernetové síťové linky umožňující snadnou konfiguraci a rychlý přenos dat.

Multianalýza řeší současně dva úkoly – vlastní měření a zpracování dat několika různými způsoby analýzy současně, např. FFT analýzou, 1/n oktávovou analýzou (CPB analýzou) nebo analýzou celkových úrovní.

### **5.3.1 PULSE a prostředí LabShop**

Systém PULSE se skládá ze dvou částí. Ze softwarového prostředí PULSE LabShop instalovaném na poměrně výkonném počítači běžného typu PC a externí hardwarové jednotky. Spojení je zajištěno snadno konfigurovatelnou ethernetovou síťovou linkou s rychlým přenosem dat. Hardware PULSE je tvořen rámem, popřípadě rámy (3560 C, 3560 D, atd.), který obsahuje moduly pro úpravu signálů a sběr dat. Software PULSE je modulární – to znamená, že uživatel má možnost přidat libovolný počet dostupných softwarových modulů pro další specifická měření a aplikace. Stejným způsobem lze přidávat také hardwarové moduly a rozšiřovat tak možnosti systému. Nicméně každý modul znamená nemalé finanční zatížení.

Každý jednotlivý fyzický vstup na HW modulu je nazván kanálem s příslušným číslem. Na těchto kanálech jsou detekovány vstupy, které jsou v konfiguračním organizátoru programu LabShop reprezentovány jednotlivými signály. Důležitým aspektem u PULSE je právě fakt, že zde existuje rozdíl mezi kanály a signály.



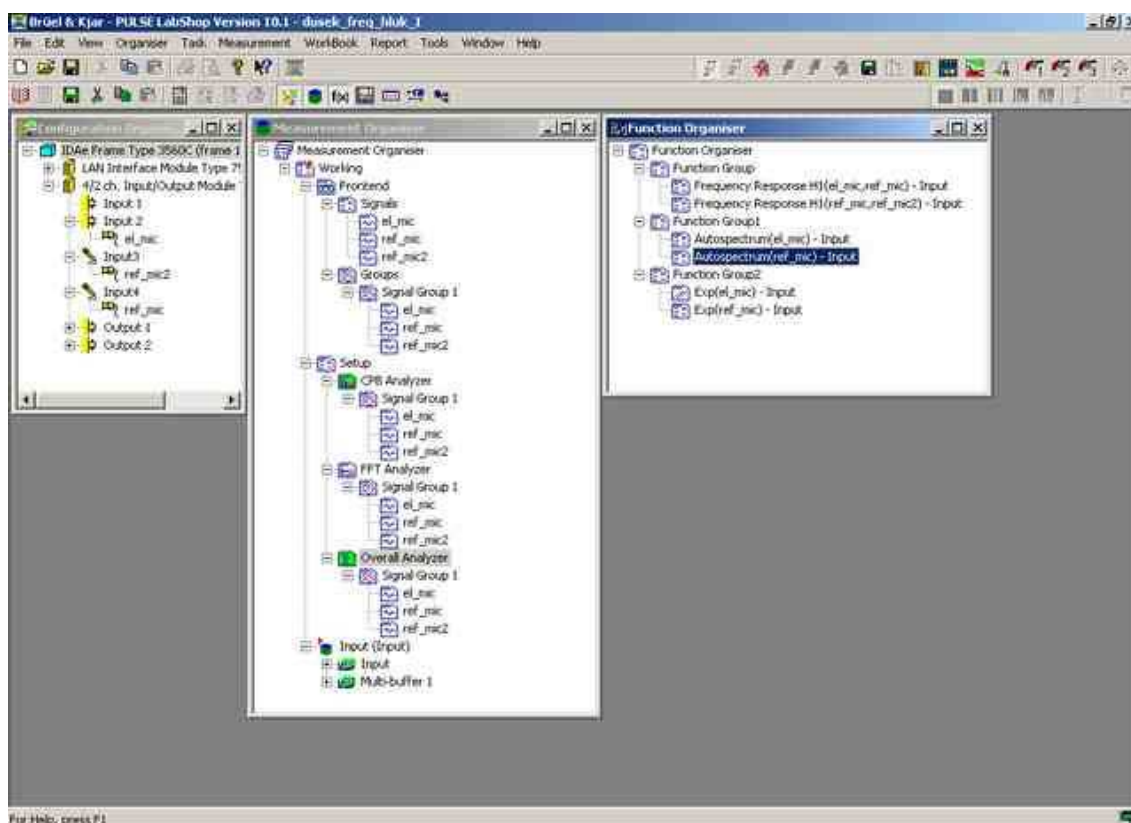
*Kanál* reprezentuje měřicí řetězec od fyzického snímače (např. mikrofon nebo akcelerometr) přes fyzický konektor na front-endu PULSE až po software v PC. Zde je pouze jeden snímač a kanál na jeden fyzický konektor na front-endu.

*Signál* je reprezentací kanálu, který je v PULSE použit pro analýzu a zobrazení. Může existovat více signálů pro jeden kanál. To může být užitečné v případě odlišného digitálního zpracování signálu pro různé typy analýzy – například při různém vážení ve frekvenční oblasti (A, B, C, D) u dvou akustických signálů připojených na stejný kanál. Některé nastavované vlastnosti se týkají pouze jednotlivých signálů, zatímco jiné mohou být aplikovány na všechny signály připojené na kanál. [14]

### **5.3.2 Vytvoření projektu, nastavení přístrojů a analyzátorů**

Všechny informace o nastavení a konfiguraci měření jsou ukládány do tzv. *projektů měření* a mohou být opakovaně použity pro další práci s analyzátelem. Technologie hardware PULSE umožňuje připojení snímačů všech vývojových typů, od těch nejstarších až po moderní zařízení.

Neexistuje žádná standardní metoda pro obsluhu PULSE, protože tato modulární platforma umožňuje uživatelsky definovaná nastavení a procedury. Lze říct, že existuje tolik metod obsluhy PULSE, kolik je jeho uživatelů. Jeden z nejběžnějších a ověřených způsobů ovládání projektů PULSE spočívá v použití organizátorů (*Organizers*) společně s panely nástrojů, přepínacími tlačítky, příkazovými tlačítky a místními nabídkami. Procedura měření zpravidla probíhá v logickém pořadí: nastavení snímačů (*Configuration Organizer*), základní měření a analýza (*Measurement Organizer*), zpracování naměřených dat (*Function Organizer*) a může následovat zobrazení výsledků (*Display Organizer*) a vytváření reportů (*Report Organizer*).



Obr. 20: Obrazovka projektu PULSE LabShop

### 5.3.2.1 Připojení snímačů

Jednotka front-end nabízí připojení snímačů pomocí konektorů LEMO nebo BNC. Mikrofonní sonda nedisponuje ani jedním z nich, byla tedy připojena kabelem z konektoru jack 3,5 mm s redukcí na BNC a to na vstupní kanál číslo 2.

Měření charakteristik vyžaduje referenční měřicí mikrofon, kterým je v našem případě tlakový kondenzátorový mikrofon pro volná pole Brüel&Kjaer typ 4189. Je připojen spolu s předzesilovačem Brüel&Kjaer typ 2669C kabelem na vstup LEMO kanálu 3. Pro možnost srovnání naměřených křížových spekter a frekvenčních charakteristik sondy s nejkvalitnějším řešením jsme připojili druhý mikrofon stejného typu (4189) na kanál 4.



Obr. 21: Mikrofon Brüel & Kjær 4189



Obr. 22: Předzesilovač Brüel & Kjaer 2669C

Při spuštění programu PULSE LabShop se automaticky provede detekce hardware, tedy front-endu a provede se výpis informace o hardware do konfiguračního organizátoru (*Configuration Organizer*).

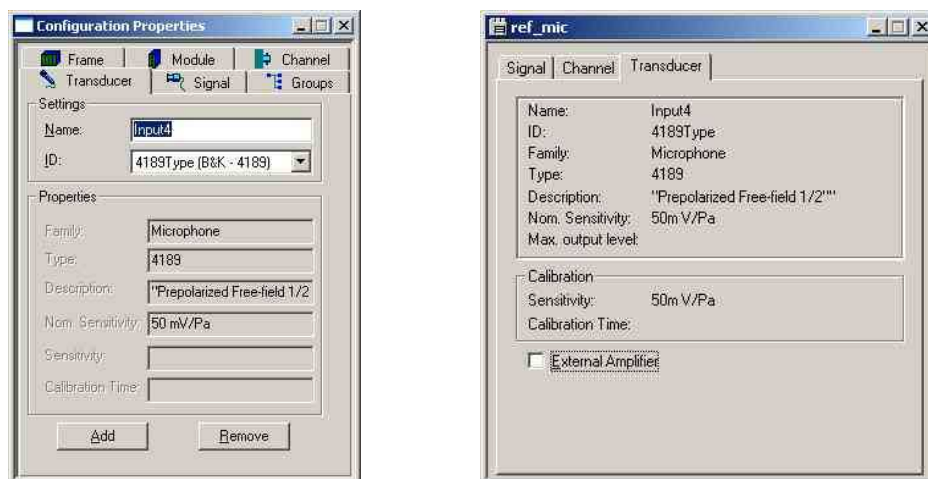
### 5.3.2.2 Konfigurační organizátor

Konfigurační organizátor se používá pro nastavení základní konfigurace hardware. Okno organizátoru obsahuje stromový výpis periferií rozdělený na LAN interface zajišťující komunikaci, pro vlastní měření je však nedůležitý a 4/2 Input/Output Module, tedy čtyři vstupní a dva výstupní kanály. V konfiguračním organizátoru PULSE defaultně vkládá signál pro každý kanál v systému. Outputs představují výstupy pro dva generátory, kterými jednotka disponuje.

Pro naše měření se budeme zabývat kanály *Input*. Definice jednotlivých komponent hardwaru mohou být zobrazeny a editovány kliknutím pravým tlačítkem myši na ikonu v organizátoru a vybráním *Properties*, kde provedeme výběr a nastavení konkrétních zapojených zařízení. Pro snadnou orientaci je popsán měřený mikrofon *el\_mic* a referenční mikrofony *ref\_mic* a *ref\_mic2*. Ve vlastnostech každého vstupu přidáme tlačítkem *Add* snímač – *Transducer*. Vybereme z katalogu námi použitý typ a přesvědčíme se o tom, jak je nastaveno napájení snímače. Je totiž možné vybrat z voleb

- *Direct* – snímač má vlastní napájení nebo je použito externího signálu; připojení na BNC konektor vstupního modulu
- *CCLD* – snímač používá napájení typu CCLD, ICP nebo ISOTRON; připojení na BNC konektor vstupního modulu
- *Preamp* – snímač používá napájení mikrofonu, připojení na 7-pin konektoru LEMO vstupního modulu.

Na kanálu 2 tedy provedeme volbu *Direct* a pro kanály 3 a 4 volbu *Preamp*.



Obr. 23: Konfigurace měřicího mikrofону

### 5.3.2.3 Organizátor měření

Organizátor měření poskytuje základní data z autospekter a cross-spekter a časové funkce, tam kde jsou k dispozici. Šablony měření v organizátoru měření obsahují všechny informace pro provedení měření. V organizátoru měření může být vytvořeno mnoho šablon, avšak v jednom okamžiku může být aktivní pouze jedna šablona. Aktivní šablona je označena červenou hvězdičkou. Defaultní šablona měření se jmenuje *Working*.

Také organizátor měření je tvořen typickou stromovou strukturou, obsahuje tři hlavní komponenty:

- *Front-end*: konfigurace front-endu načtená z konfiguračního organizátoru
- *Setup*: nastavení měření včetně analyzátoru (nebo více analyzátorů) pro analýzu/měření včetně nastavení skupin signálů, které má analyzátor zpracovávat (načteno z konfiguračního organizátoru nebo vloženo do organizátoru měření)
- *Input(s)*: naměřená data uložená ve vstupním bufferu (bufferech)

Organizátor je nutné při změnách provedených v hardwarové konfiguraci aktualizovat pomocí funkce *Activate Template* přístupné přes pravé tlačítko myši.

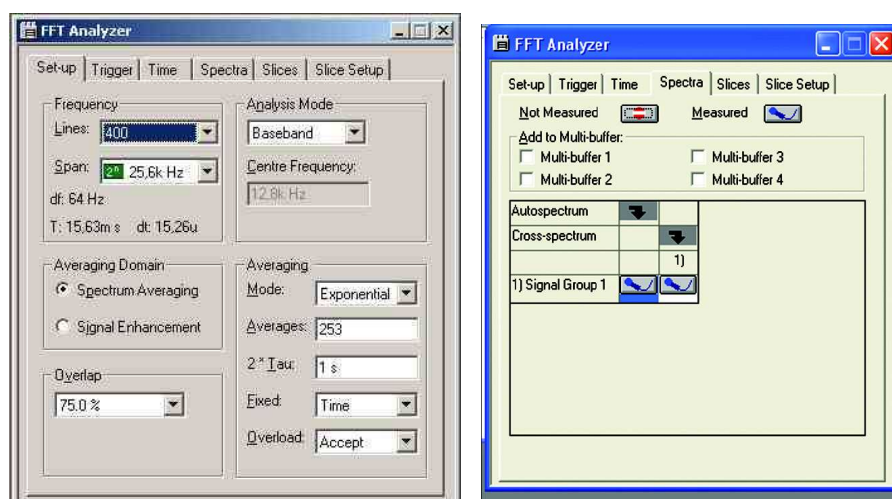
Jak již bylo řečeno, PULSE pracuje se signály jako reprezentanty používaných kanálů. Ty jsou v rámci organizátoru měření uspořádány ve skupinách pro snadnější

práci s velkým množstvím signálů. Signál musí patřit do skupiny signálů, která má být analyzována i když by skupina měla obsahovat pouze jediný signál.

V našem projektu je tedy vytvořen signál pro každý kanál, které PULSE defaultně vkládá. a jedna skupina signálů, ve které jsou obsaženy signály *el\_mic*, *ref\_mic* a *ref\_mic2*.

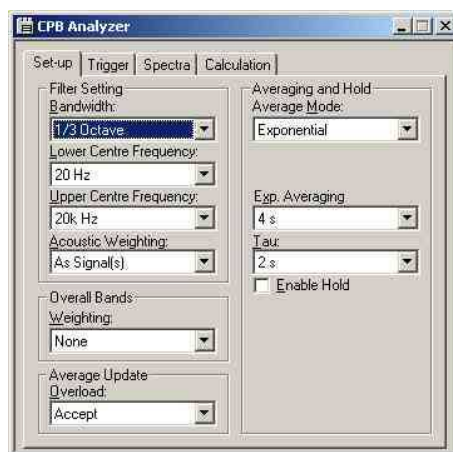
V tuto chvíli je nakonfigurován veškerý použitý hardware. Zde si uvědomíme, jaká měření budeme provádět a na základě toho provedeme nastavení analyzátorů. V části *Setup* vybereme *Insert* a ze seznamu přístrojů vybereme FFT Analyzer, CPB Analyzer a Overall Analyzer. Provedeme nastavení vlastností analyzátorů.

**FFT Analyzer** nabízí v záložce *Set-up* nastavení frekvenčního rozsahu, rozlišení, průměrování a typ průměrování, dále je nutno v záložce *Spectra* určit, jaká měření budeme požadovat. Použité nastavení je zobrazeno na Obr. 24



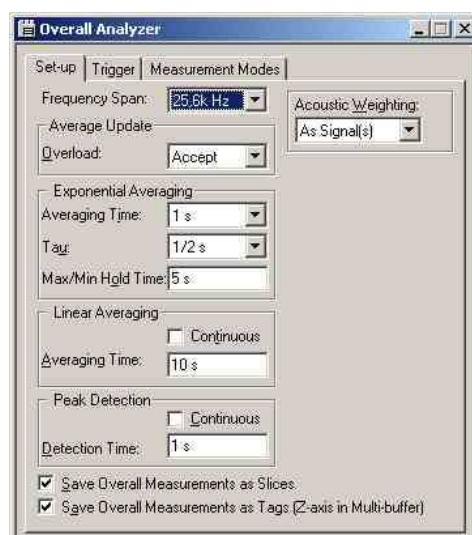
Obr. 24: Nastavení FFT analyzátoru

**CPB Analyzer.** Zde je stěžejní výběr šířky pásma pro 1/n oktávovou analýzu, dolní a horní mezní kmitočet, akustické vážení a průměrování. Použité nastavení je na Obr. 25.



Obr. 25: Nastavení CPB analyzátoru

*Overall Analyzer* neboli analyzátor celkových hladin je použit pro zobrazování celkových hladin měřených signálů. Z něj získaná data jsou ukládána do Multi-bufferu a použita pro měření směrové charakteristiky sondy. Použité nastavení je opět přehledně na Obr. 26



Obr. 26: Nastavení Overall analyzátoru

#### 5.3.2.4 Funkční organizátor

Analyzátory v organizátoru měření poskytují základní data časové a spektrální analýzy, která jsou použita v organizátoru funkcí pro následné zpracování dat v dalších funkcích jako je frekvenční odezva, impulsní odezva atd.

V projektu jsme chtěli nastavit PULSE pro měření dvou autospekter CPB a pro srovnání FFT, frekvenční odezvy H1 z CPB a FFT a směrových charakteristik Overall Analyzátozem. Použití více analyzátorů najednou je však omezeno nakoupenou licencí.

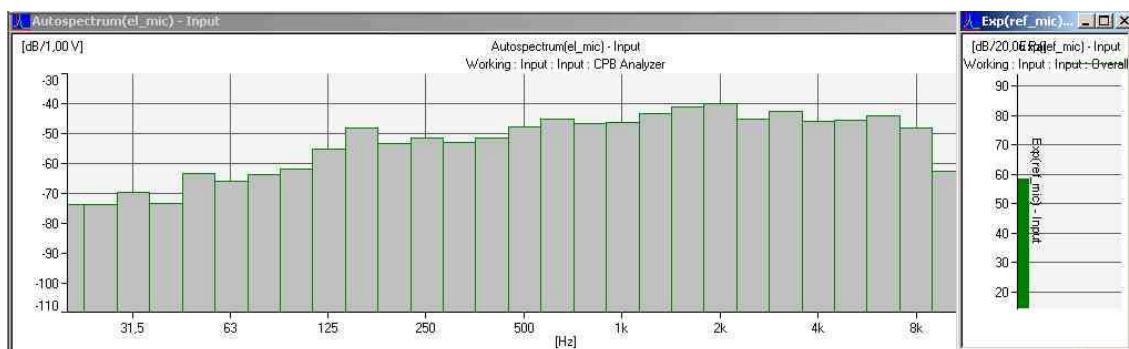
Bylo tedy nutné nastavit zvlášť úlohy zpracovávané FFT a zvlášť CPB analyzátořem. Proto je v projektu ve funkčním organizátoru nastavení pro použití pouze jednoho analyzátořu, při povolení funkce jiného analyzátořu je třeba konfiguraci obnovit. Uspořádaní funkcí do skupin zpřehledňuje uspořádaní a ochrání nastavení před změnou parametrů, vlivu volby analyzátořu však tímto způsobem není možné zabránit.

**Autospektrum** matematicky označované jako výkonová spektrální hustota vyjadřuje průměrný výkon jednotlivých frekvenčních složek spektra. Časový průběh záznamů pro výpočet lze vážit časovými okny a jednotlivé hodnoty výkonové spektrální hustoty lze průměřovat z volitelného počtu záznamů, aby se snížil rozptyl výsledného spektra. V případě, kdy není zkoumán konkrétní zdroj hluku, i přesto naměřené autospektrum přináší důležité informace, dává totiž představu o tzv. hluku pozadí. Okno nastavení funkce při zpracování CPB analyzátořem je zobrazeno na Obr. 27.



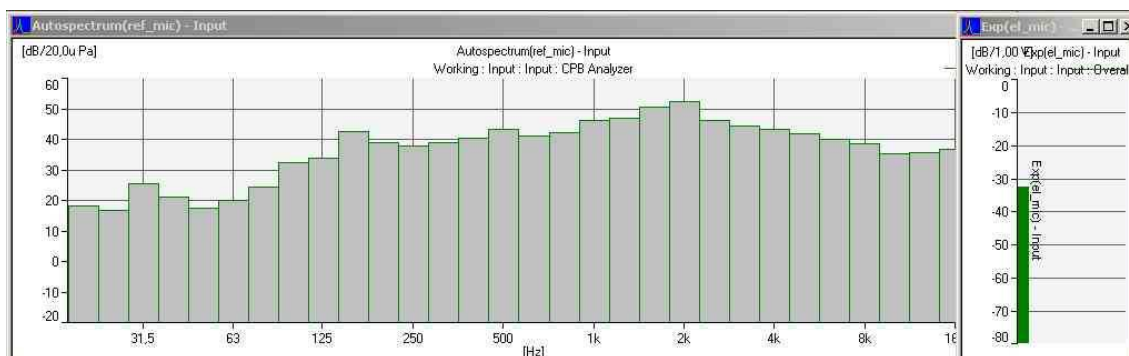
Obr. 27: Nastavení funkce autospektrum

Naměřená autospektra mikrofonů se zobrazením celkových hladin jsou na Obr. 28 a 29, autospektra vypočtená FFT analyzátořem na Obr. 30 a 31.

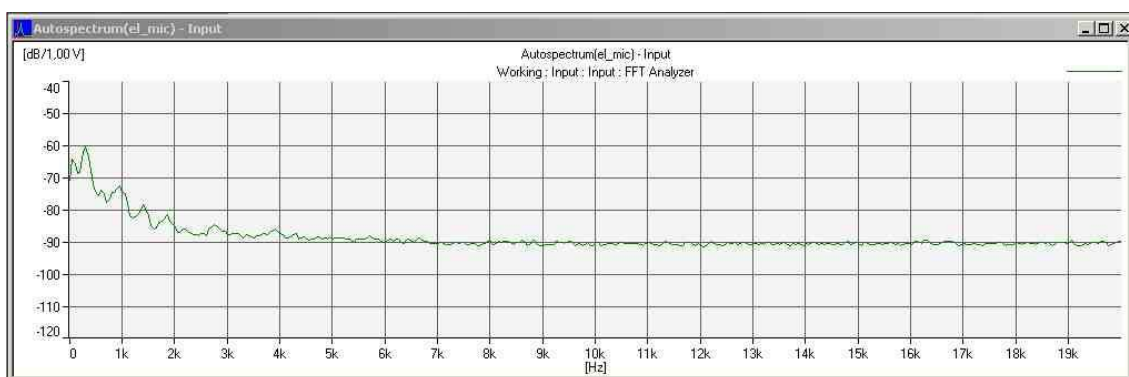


Obr. 28: Autospektrum – elektretový mikrofon (CPB)

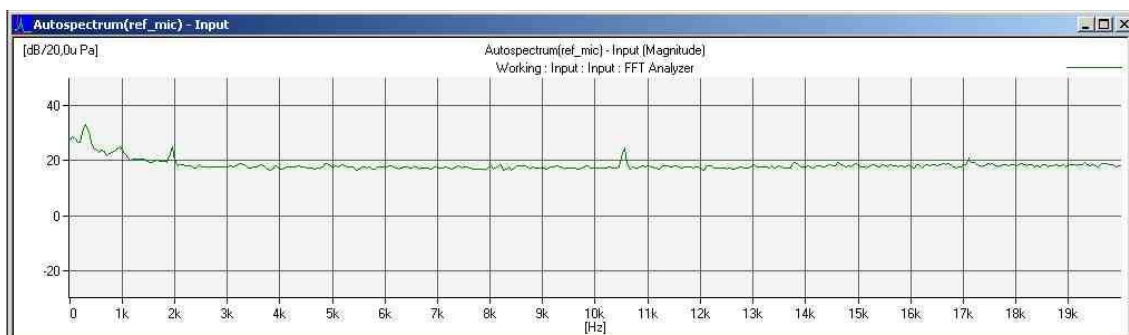




**Obr. 29: Autospektrum – referenční mikrofon (CPB)**



**Obr. 30: Autospektrum – elektretový mikrofon (FFT)**



**Obr. 31: Autospektrum – referenční mikrofon (FFT)**

### 5.3.3 Cejchování

Pro přesné cejchování mikrofونů se používají různé metody. Jejich podrobný rozbor je uveden např. v [12]. Velmi jednoduchým způsobem však lze kalibrační konstantu určit tak, že budíme měřený systém signálem známého tvaru a analyzujeme spektrum odezvy měřeného mikrofону a přesného měřicího mikrofону se známou citlivostí. K vybuzení bylo použito bílého šumu generovaného v programu MATLAB. Jako referenční mikrofon byl použit B&K 4189, který má nominální citlivost 50 mV/Pa.



Citlivost mikrofonu je poměr výstupního napětí mikrofonu a akustického tlaku, který toto napětí vybudil. Udává se v mV / Pa nebo jako poměrná hodnota v dB vztažená k referenční úrovni 1 V / Pa. Citlivost mikrofonu je obecně frekvenčně závislá.

Kalibrační konstantu měřené mikrofonní sondy zjistíme porovnáním celkového akustického tlaku, který vybudil mikrofon na změřené napětí. Autospektrum referenčního mikrofonu udává přesnou hladinu akustického tlaku, naměřené autospektrum elektretového mikrofonu nám poslouží ke zjištění napětí na mikrofonu.

Výpočet celkových úrovní provedeme vyhodnocením hladin v jednotlivých třetinooktávoích pásmech, která jsou zobrazena v Tabulce 1 podle vztahu

$$L_{celk} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}}.$$

**Tabulka 1: Výpočet celkových hladin z třetinooktávoích pásem**

$f [Hz]$	$L_p [dB]$	$L_{dBV} [dB]$	$f [Hz]$	$L_p [dB]$	$L_{dBV} [dB]$
20	53	-63	800	59	-52
25	51	-63	1000	55	-51
31,5	60	-60	1250	55	-51
40	67	-63	1600	52	-50
50	66	-60	2000	49	-57
63	68	-58	2500	45	-55
80	70	-54	3150	47	-54
100	69	-52	4000	47	-53
125	66	-53	5000	46	-52
160	67	-50	6300	46	-53
200	66	-47	8000	50	-54
250	64	-48	10000	46	-57
315	63	-46	12500	44	-61
400	60	-50	16000	42	-63
500	62	-46	20000	40	-62
630	62	-47			
<b>celková hladina</b>			77,7	-36,7	

Platí

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}, \text{ kde } p_0 = 20 \mu Pa \quad (4)$$

a

$$L_{dBV} = 20 \log \frac{U}{U_0}, \text{ kde } U_0 = 1 V \quad (5)$$

Prostým odlogaritmováním (4) dostaneme, že

$$p = 10^{\frac{L_p}{20} + \log p_0}, \text{ odkud po dosazení akustický tlak}$$

$$p = 153,47 \text{ mPa}$$

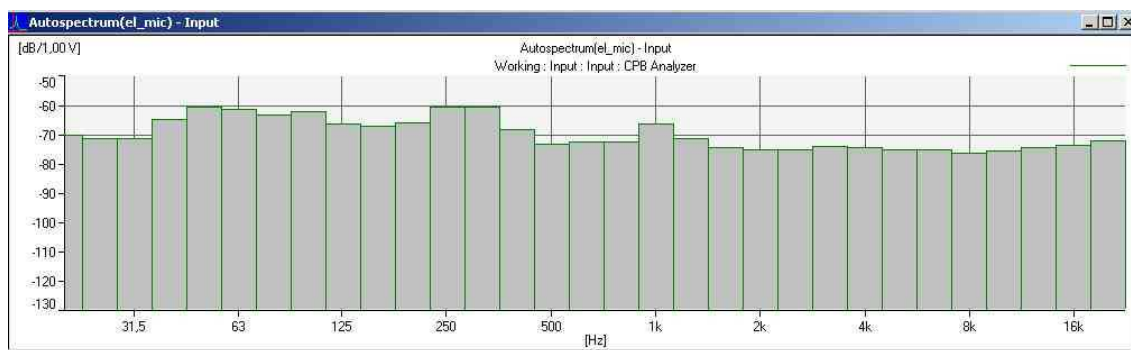
z (5) podobným postupem získáme pro celkové napětí mikrofonu

$$U = 10^{\frac{L_{dBV}}{20}}, \text{ dosadíme a potom}$$

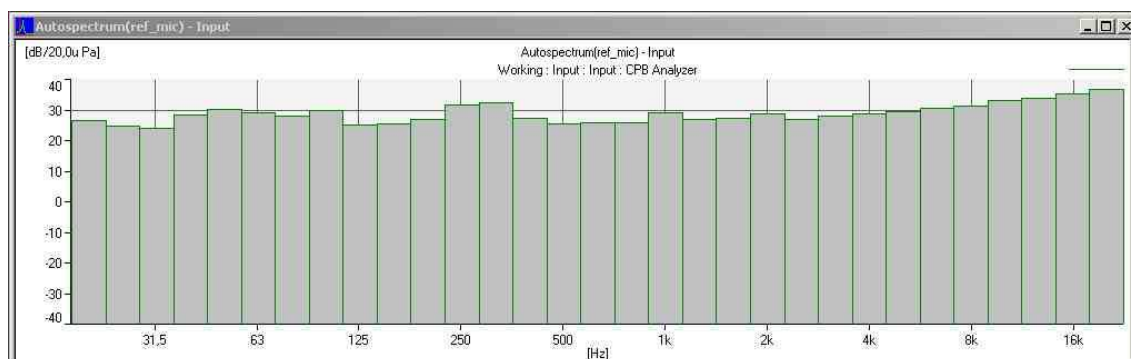
$$U = 46,21 \text{ mV}.$$

Porovnáním získáme převodní konstantu

$$K = \frac{U}{p} = \frac{14,62 \text{ mV}}{153,47 \text{ mPa}} = 95 \text{ mV} / \text{Pa}.$$



Obr. 32: Autospektrum (hluk) - elektretový mikrofon



Obr. 33: Autospektrum (hluk) - referenční mikrofon

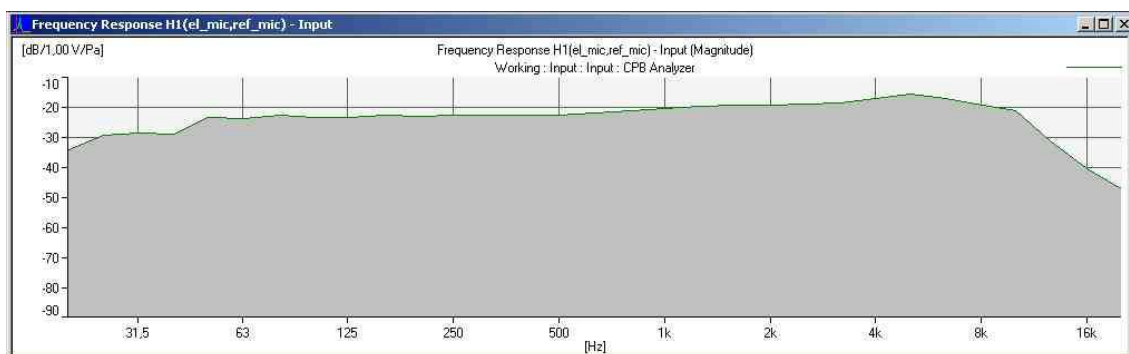
### 5.3.4 Frekvenční odezva – kmitočtová charakteristika

Jak bylo uvedeno v části 5.1, frekvenční charakteristiku mikrofonu lze určit tak, že dochází k jeho buzení zdrojem známých vlastností. Měření probíhalo tak, že bylo použito buzení mikrofonů bílým šumem z reproduktoru. Podélně proti směru šíření zvuku byly vedle sebe umístěny měřený a měřicí mikrofón tak, aby vzdálenost mezi zdrojem hluku a mikrofony byla zhruba 1 m tak, jak je doporučeno při měření kmitočtových charakteristik. Místnost laboratoře považujeme za prostor volného zvukového pole, což může způsobovat nepřesnosti. Analyzátoři CPB i FFT byla naměřena frekvenční odezva H1.

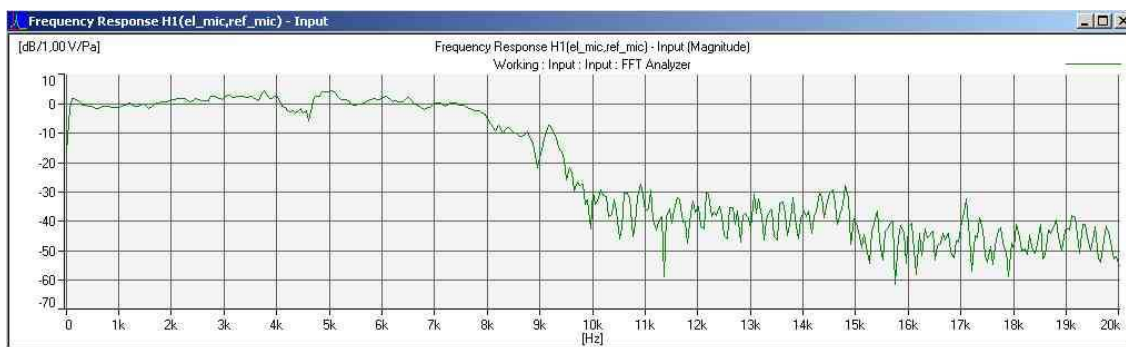


Obr. 34: Nastavení pro měření frekvenční odezvy

V této fázi byly nastaveny odporové trimry korekčního předzesilovače tak, aby charakteristika mikrofonní sondy byla co nejvyrovnanější. Grafy amplitudového spektra spočtené CPB i FFT analyzátořem jsou na obr.

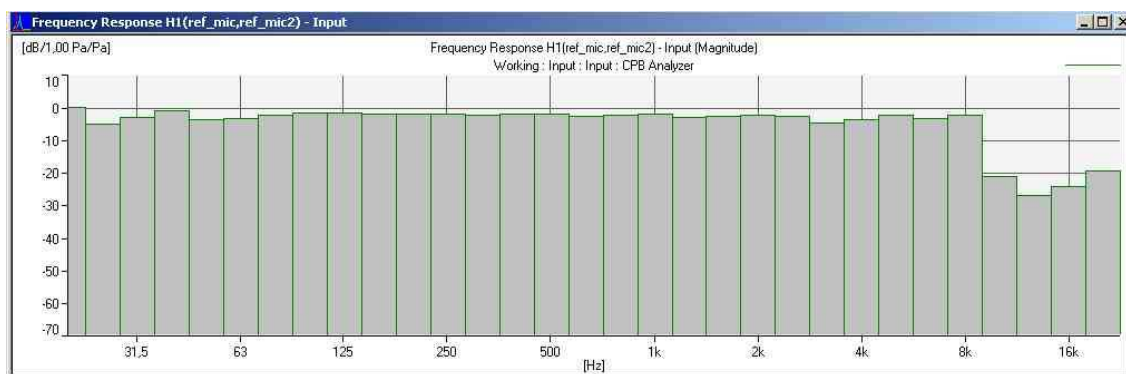


Obr. 35: Amplitudová frekvenční charakteristika elektretového mikrofonu (CPB)

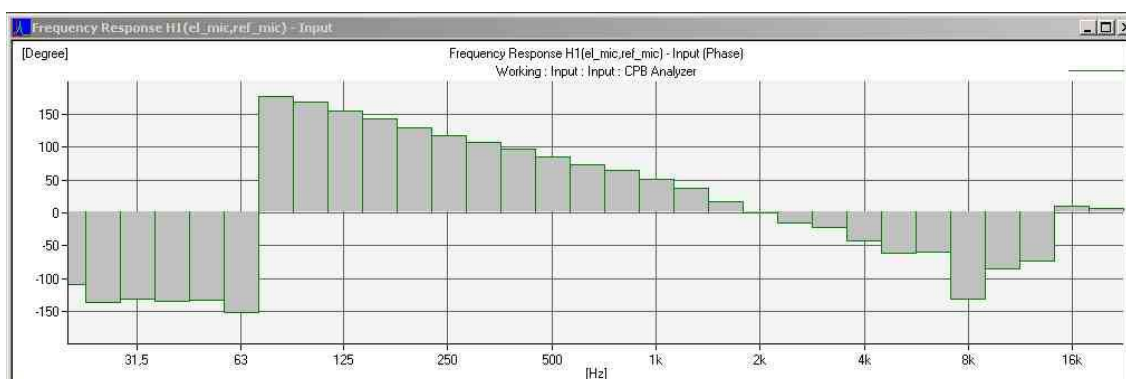


**Obr. 36: Amplitudová frekvenční charakteristika elektretového mikrofonu (FFT)**

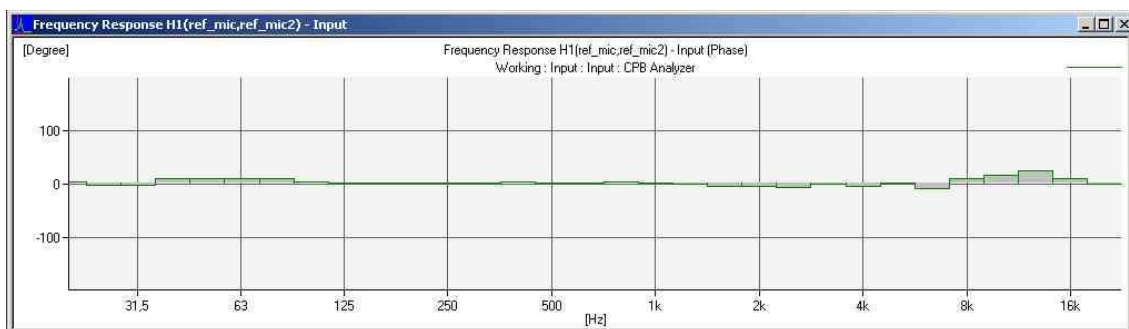
Srovnání rozdílnosti vlastností jednoduché sondy a přesného měřicího mikrofonu bylo provedeno změřením frekvenční odezvy s použitím dvou měřicích mikrofonů. Všimněme si hlavně tvaru spektra fáze na Obr. 38 a 39.



**Obr. 37: Amplitudová frekvenční charakteristika – referenční mikrofon (CPB)**



**Obr. 38: Fázová frekvenční charakteristika – elektretový mikrofon (CPB)**



**Obr. 39: Fázová frekvenční charakteristika – referenční mikrofon (CPB)**

Pro zajímavost bylo zobrazeno i křížové spektrum FFT analyzátozem (Obr. 40), které je používáno pro výpočet frekvenční odezvy tak, jak je popsáno v kap. 5.1.

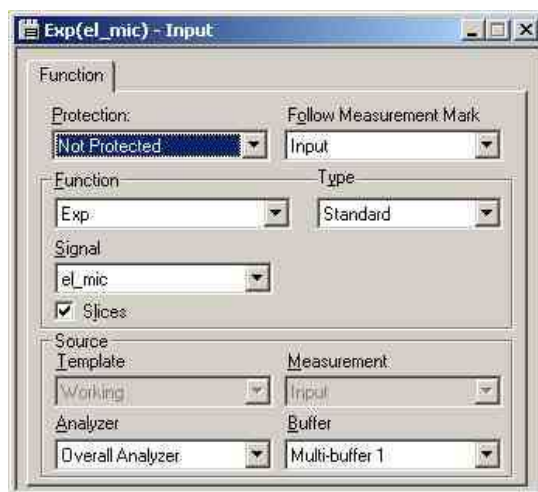


**Obr. 40: Křížové spektrum (FFT)**

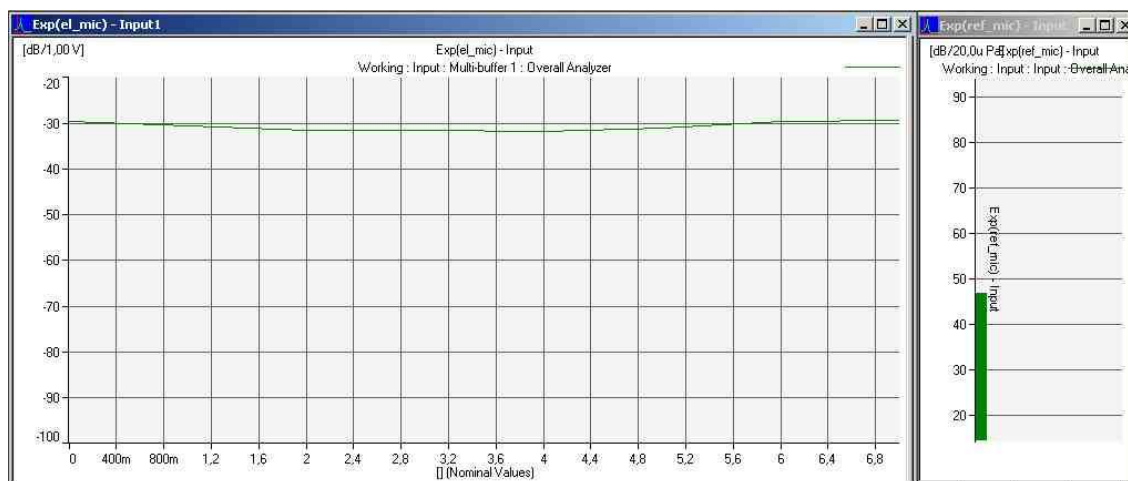
### 5.3.5 Směrová charakteristika

Při měření směrové charakteristiky byl mikrofon opět buzen širokopásmovým bílým šumem. K určení celkové hladiny akustického tlaku byl použit *Overall Analyzer* v nastavení popsaném výše. Data byla ukládána do multibufferu a nastaveno ruční spouštění měření (*trigger*). Předpokládali jsme měření v rovině šíření zvuku v úsecích po 45°, do multibufferu se tedy ukládalo osm hodnot. Použité nastavení funkčního organizátoru je na obr. 38 a získaná směrová charakteristika na Obr. 41.

Výrobce uvádí, že směrová charakteristika elektretového mikrofonu je všesměrová, v našem případě byl zaznamenán pokles zhruba o 1 dB v poloze 180°. I takovou charakteristiku lze však považovat za všesměrovou.



Obr. 41: Nastavení pro měření směrové charakteristiky



Obr. 42: Směrová charakteristika – elektretový mikrofón

## **6. Ověření funkce na modelovém případě**

Použití navržené mikrofonní sondy se předpokládá pro zkoumání aerohluků ve vozidle při testech v aerodynamickém tunelu či v běžném provozu. Na druhém případě byly otestovány možnosti sondy. Byla použita pro pokusné zjištění místa netěsnosti mezi těsněním okenního rámu a sklem bočního okna automobilu za jízdy při jízdě po dálnici, tedy v podmínkách poměrně značného okolního hluku. Vzhledem k malé velikosti mikrofону se skutečně lze přiblížit až ke zdroji hluku. Bylo zaznamenána jistá úroveň vlastního šumu zařízení, která však může být způsobena kvalitativními vlastnostmi příslušející prototypovému provedení. Lze dále předpokládat, že bude-li proudění vzduchu štěrbinou příliš intenzivní, naráží-li na membránu mikrofónu silný proud vzduchu, může docházet k přebuzení. Vhodné by tedy bylo doplnit mikrofón o ochranu proti větru při zvážení následků zhoršení přenosu vysokých frekvencí.

## **Závěr**

V rámci práce se podařilo shrnout základy komplexní problematiky zvuku a jeho měření. Bylo nutné se seznámit jak s teorií akustiky, s pravidly návrhu elektroakustických řetězců, systémem pro návrh a výrobu desek plošných spojů, ale závěrem i s analýzou signálů a na základě osvojení si základní práce s multianalýzátozem PULSE byl vytvořen projekt pro měření vlastností mikrofonů.

Výběr součástek použitých pro reprezentaci jednotlivých funkčních částí sondy byl řízen snahou o nízké náklady a potřebu malého počtu diskrétních součástek tak, aby bylo dosaženo malých rozměrů přístroje. Použití předzesilovače s korekcemi se ukázalo jako účelné, bylo tak docíleno poměrně vyrovnané frekvenční charakteristiky. Použité integrované obvody nejsou klasifikovány jako nízkošumové, což nebylo při výběru vzhledem k malým dosahovaným výkonům přímo vyžadováno. Úroveň šumu je však znatelná a v této části by bylo patrně žádoucí použít nízkošumové obvody, jejichž výběrem jsme se po zjištění této skutečnosti také zabývali. Jako alternativu k obvodu TDA1524A lze navrhnout integrovaný obvod LM1036, který pracuje na podobném principu, rovněž umožňuje úpravu přenosových vlastností a jeho cena je jen o málo vyšší. Nízkošumovým koncovým stupněm pro sluchátka může pak být i obvod TDA1308. Vzhledem k různým požadavkům na zapojení každého integrovaného zesilovače však není možná přímá náhrada uvedených součástek v konstruovaném zapojení a bylo by nutné provést nový návrh. Nabytá zručnost v ovládání návrhového prostředí EAGLE by patrně mohla zkrátit dobu potřebnou pro vytvoření návrhu nové desky, vytvořený projekt v PULSE by bylo možné použít bez úprav pro nové měření. Uvedené alternativní obvody jsou bohužel dostupné pouze na objednávku a z časových důvodů proto nebylo k tomuto „nízkošumovému“ návrhu přistoupeno. Zde se tedy pro případná vylepšení otevírá cesta.

Zde navržené zařízení tak může sloužit jako příklad řešení problému, ale i takové je funkčním přístrojem se známými vlastnostmi, který je připraven k použití.

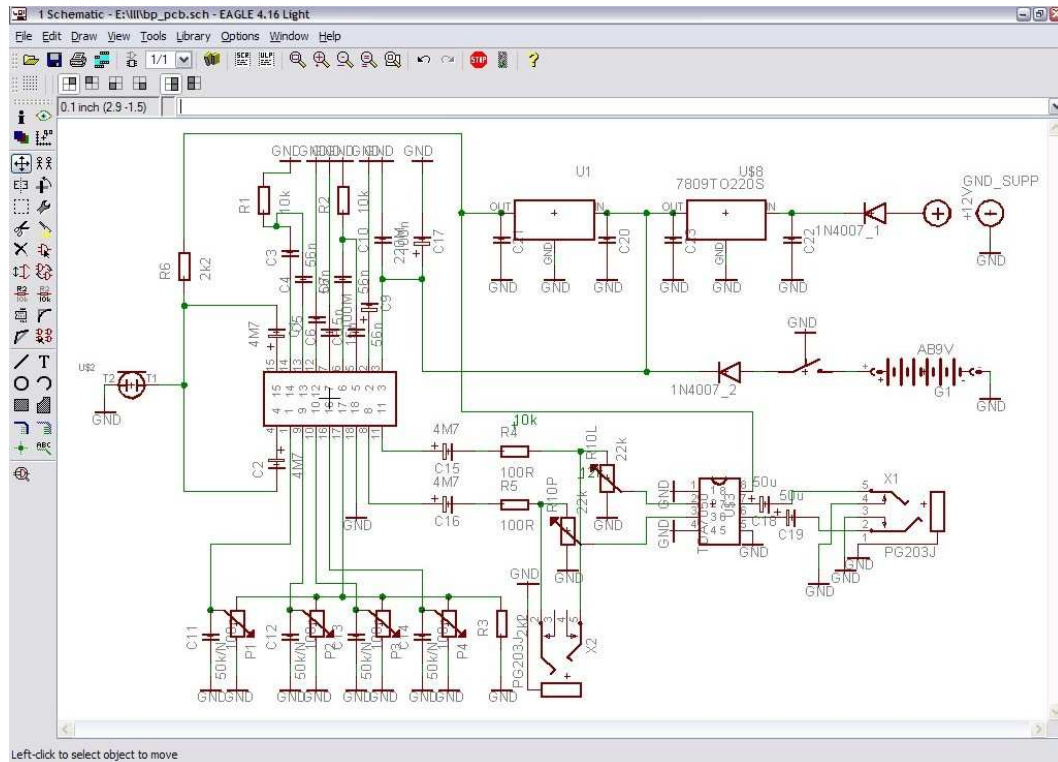


## Literatura

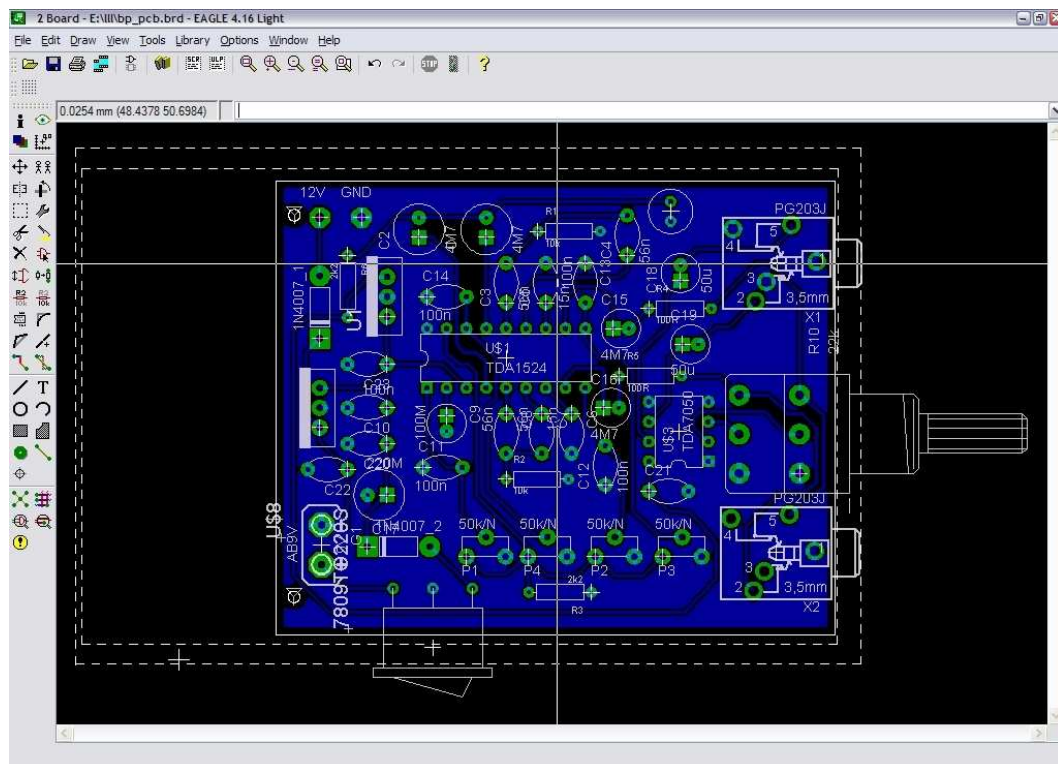
- [1] Beranek, Leo L. Snižování hluku. 1. vyd. Praha: SNTL, 1965, 740 s. Redakce teoretické literatury
- [2] Kolmer, Felix; Kyncl, Jaroslav. Prostorová akustika. 2. nezm. vyd. Praha: SNTL, 1982, 242 s.
- [3] Škvor, Zdeněk. Akustika a elektroakustika. Vyd. 1. Praha: Academia, 2001, 527 s.
- [4] Apetaur, Milan; Ráfl, Jan. Konstrukce automobilů díl I., Hluk motorových vozidel, 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT , 1994, 149 s.
- [5] Salava, Tomáš. Elektroakustická a elektromechanická měření, Vyd. 1. Praha: SNTL, 1979, 304 s.
- [6] Svoboda, Jiří; Brda, Jiří. Elektroakustika do kapsy. 2. nezm. vyd. Praha: SNTL, 1981, 367 s
- [7] Merhaut, Josef. Elektroakustické měniče. 2. vyd. Praha:SNTL, 1962, 77 s.
- [8] Merhaut, Josef. Teoretické základy elektroakustiky. 4. mírně opr. vyd. Praha: Academia, 1985, 327 s.
- [9] Tůma, Jiří. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7
- [10] Engdahl, Tomi. Powering microphones. [online] URL: <[www.epanorama.net/circuits/microphone\\_powering.html](http://www.epanorama.net/circuits/microphone_powering.html)>
- [11] Předzesilovač pro kondenzátorový mikrofón, Amatérské rádio, 4/2002
- [12] Boleslav, Aleš. Nízkofrekvenční a elektroakustická měření, 1. vyd. Praha: SNTL, 1961, 221 s.
- [13] Nave, Carl R. Microphones [online], URL: <[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/audio/mic.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/audio/mic.html)>
- [14] Junek, Martin. Komplexní systém pro měření akustické intenzity, diplomová práce, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005, 60 s.

- [15] Kolektiv: Meranie v akustike, 1. vyd. Bratislava: Dom techniky ČSVTS, 1986, 108 s.
- [16] Začínáme s PULSE, Brüel & Kjaer, 2004, 126 s.
- [17] Hassal, J. R., Acoustic Noise Measurements, Vyd. 5, Denmark: Brüel & Kjaer, 1988, 310 s., ISBN 87-87355-21-3
- [18] Stereofonní předzesilovač. Praktická elektronika – Stavebnice a konstrukce, 3/1999, s. 2-3
- [19] Datové listy součástek TDA1524A, TDA7050, LM1036, TDA1308

## Příloha A



Obr. PA-1: Schéma zapojení v systému EAGLE

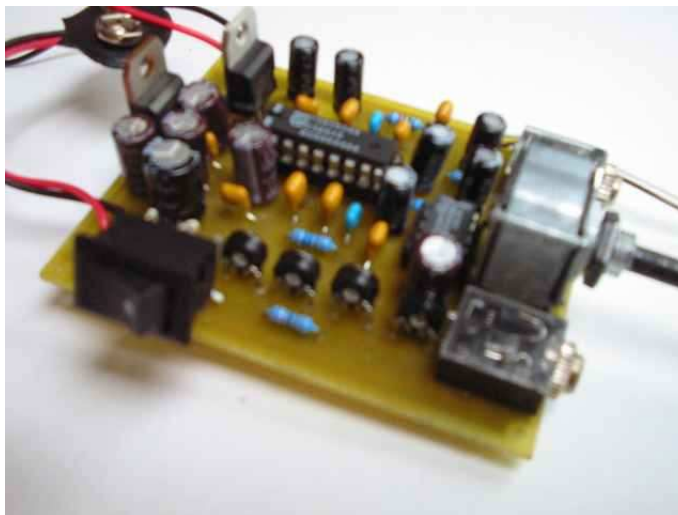


Obr. PA-2: Návrh DPS v systému EAGLE

## Příloha B



Obr. PB-1: Fotografie osazené desky plošného spoje



Obr. PB-2: Fotografie osazené desky plošného spoje